

**DER EINFLUSS VON HELLEM LICHT AUF DIE
CIRCADIANE PERIODIK DES MENSCHEN**

JAN POLASEK

1986

*Diss
München*



Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41547927_0117

AUS DEM MAX-PLANCK-INSTITUT FÜR PSYCHIATRIE

DIREKTOR: PROF. DR. D. PLOOG

DER EINFLUSS VON HELLEM LICHT AUF DIE

CIRCADIANE PERIODIK DES MENSCHEN

INAUGURAL-DISSERTATION

ZUR ERLANGUNG DER DOKTORWÜRDE IN DER GESAMTEN MEDIZIN
AN DER LUDWIG MAXIMILIANS-UNIVERSITÄT ZU MÜNCHEN

VORGELEGT VON

JAN POLASEK

AUS HECHENDORF

1986

Mit Genehmigung der Medizinischen Fakultät
der Universität München

Berichterstatter : Prof. Dr. R. Wever

Mitberichterstatter : Prof. Dr. K. Thureau

Dekan : Prof. Dr. W. Spann

Tag der mündlichen Prüfung : 22. 05. 1986

INHALTSVERZEICHNIS

	Seite
I. BEGRIFFSERLÄUTERUNGEN	1
II. EINLEITUNG	3
III. VORÜBERLEGUNG ZUR METHODIK	9
IV. METHODIK	11
1. Versuchspersonen	11
2. Versuchsraum	12
3. Versuchsplan	15
4. Meßgrößen	18
5. Behandlung der Meßwerte	20
6. Auswertung der Daten	22
V. ERGEBNISSE	28
1. Persönlichkeitsdaten	28
2. Aktivität	32
3. Rektaltemperatur	42
4. Phasenbeziehung von Aktivität und Rektaltemperatur	70
5. Urinvariablen	73
VI. DISKUSSION	81
1. Persönlichkeitsdaten	81
2. Synchronisierbarkeit der endogenen Rhythmik durch einen Zeitgeber mit hellem Licht	83
VII. ZUSAMMENFASSUNG	94
VIII. LITERATURVERZEICHNIS	96

I. BEGRIFFSERLÄUTERUNGEN

Acrophase:

Phasenwinkel des Maximums einer Sinusschwingung, die an eine rhythmisch verlaufende Variable angepaßt ist. Die berechnete Acrophase hat nicht notwendig den gleichen Phasenwinkel wie das Maximum der zugrunde liegenden Variablen.

Amplitude:

Differenz zwischen minimalem (oder maximalem) Funktionswert und dem Gleichwert einer Sinusschwinung.

Circadiane(r) Periodik (Rhythmus):

Schwingung mit einer Periode(nlänge) von ungefähr 24 Stunden.

Desynchronisation:

Zustand, bei dem zwei oder mehrere verschiedene Rhythmen mit verschiedenen Perioden(längen) verlaufen.

Externe D.: Ein Rhythmus hat eine von einem äußeren Zeitgeber verschiedene Periodenlänge.

Interne D.: Verschiedene Rhythmen innerhalb eines Organismus haben verschiedene Periodenlängen. Auch eine Kombination von interner und externer D. ist möglich.

Gleichwert:

Arithmetisches Mittel aller Augenblickswerte einer rhythmisch verlaufenden Variablen innerhalb einer oder mehrerer Perioden.

Oszillator:

Schwingendes System, die "innere Uhr" des Menschen z.B. ist ein zur selbsterregten Schwingung befähigtes System.

Periode (Periodenlänge):

Zeit, nach der eine bestimmte Phase einer Schwingung wiederkehrt.

Phase:

Augenblicklicher Zustand einer Schwingung innerhalb einer Periode.

Phasenwinkel:

Wert auf der Zeitachse für eine bestimmte Phase (z.B. Acrophase), angegeben meist in Winkelgraden für eine zugrunde liegende Periodenlänge.

Phasenwinkeldifferenz:

Differenz in Winkelgraden zwischen korrespondierenden Phasen zweier oder mehrerer verschiedener Rhythmen, auch als Phasenbeziehung bezeichnet.

Synchronisation:

Zustand, in dem zwei oder mehrere Rhythmen mit gleicher Periodenlänge und fester Phasenbeziehung verlaufen.

Zeitgeber:

Periodisch verlaufende äußere Größe, die einen selbst-erregten biologischen Rhythmus (innerhalb eines Mitnahmebereiches) synchronisieren kann.

In Anlehnung an: Aschoff, Klotter und Wever [5] und Wever [36].

II. EINLEITUNG

Rhythmus ist eine wesentliche Ausdrucksform der belebten und der unbelebten Natur. Fast alle am tierischen und menschlichen Organismus faßbaren Prozesse zeigen einen rhythmischen Verlauf.

Untersuchungen über tagesperiodische Veränderungen von Körperfunktionen des Menschen finden sich schon im letzten Jahrhundert. Gierse untersuchte den Verlauf seiner Körpertemperatur erst über einen, dann über mehrere Tage [13]. Auch Jürgensen stellte Untersuchungen über den tagesperiodischen Verlauf der Körpertemperatur an. Er führte die Messungen unter ständiger Bettruhe durch und konnte zeigen, daß die Körpertemperatur auch unter diesen Bedingungen rhythmisch bleibt, womit er eine einfache Abhängigkeit der Körpertemperatur vom Ruhe-Aktivitätsverhalten ausschloß [20].

1961/62 wurden Experimente durchgeführt, bei denen die Rhythmen verschiedener Körperfunktionen des Menschen erstmals unter Ausschluß jeglicher Zeitinformation und unter konstanten Umgebungsbedingungen untersucht wurden [3]. Dabei zeigte sich einmal, daß der Rhythmus der verschiedenen Variablen erhalten bleibt, also endogenen Ursprungs ist, und zum zweiten, daß die Periodenlänge von 24,0 h abweicht und mit Mittel knapp 25 h beträgt. Von daher erklärt sich die Bezeichnung "circadian" [15]. Unter natürlichen, nicht experimentellen Bedingungen findet sich in den Rhythmen von Tier und Mensch eine Periode von genau 24 h. Das bedeutet, daß unter diesen Bedingungen die Rhythmen durch bestimmte periodisch verlaufende Umgebungsreize, von Aschoff "Zeitgeber" genannt [1], auf diese Periode von genau 24 h synchronisiert werden.

Der wichtigste die Rhythmik der meisten Pflanzen und Tiere beeinflussende Reiz ist der Wechsel zwischen Licht und Dunkel. Er ist mit seiner durch die Erdumdrehung bedingten Periodenlänge von 24 h verantwortlich für die Synchronisierung auf diese Periodenlänge. Experimentell ist ein Licht-Dunkel-Wechsel als Zeitgeber in der Lage, autonome Rhythmen bei Tieren innerhalb eines Bereiches, Mitnahmebereich genannt [29], auf eine von 24 h abweichende Periode zu synchronisieren [4]. Auch für jahresperiodische Rhythmen bei Tieren ist der Licht-Dunkel-Wechsel entscheidend. Wichtig ist hierbei das sich verändernde Verhältnis von Licht zu Dunkelzeit [14].

Zur Klärung der Zusammenhänge zwischen Licht und circadianer Periodik bedarf es nicht nur der Untersuchung eines Licht-Dunkel-Wechsels als Zeitgeber, sondern auch von Licht als konstanter Bedingung. Verändert man die Lichtintensität in Experimenten mit Dauerlicht, so verändern sich bei vielen Vogelarten und bei nachtaktiven Säugetieren die Periode und andere Parameter ihrer circadianen Rhythmen regelhaft [2, 4].

Auch beim Menschen ist der Einfluß der Lichtintensität unter konstanten Dauerbedingungen eingehend untersucht worden. Bleibt die Beleuchtungsstärke im Verlauf eines Versuches unverändert, so findet sich keine statistisch signifikante Korrelation zwischen der ermittelten Freilaufperiode und der Beleuchtungsstärke im Bereich von 0 (Dauerdunkel) bis 1000 lx [30]. Wird die Beleuchtungsstärke innerhalb eines Versuchs verändert, verändert sich häufig auch die Freilaufperiode, jedoch nicht mit gleichbleibender Korrelation und nicht statistisch signifikant. In diesen Versuchen zeigt sich ein nur geringer Einfluß der Lichtintensität auf die circadiane Periodik. Allenfalls ist eine Tendenz erkennbar, daß sich bei höherer Intensität längere Perioden zei-

gen. Die Versuche im Dauerdunkel und auch die Versuche an Blinden von Lund [23] haben zudem gezeigt, daß Licht für die Aufrechterhaltung der circadianen Rhythmik nicht erforderlich ist.

Ein statistisch gesicherter Einfluß von Licht ist allerdings dann nachzuweisen, wenn das Licht keine Dauerbedingung, sondern von der Versuchsperson schaltbar ist: Unter solchen "Wahlbedingungen" wird die Periodik verlangsamt [33].

Neben dem Einfluß der Lichtintensität ist auch der Einfluß von Licht als Zeitgeber beim Menschen untersucht worden. Dazu wurden die circadianen Rhythmen von Versuchspersonen untersucht, die unter Ausschluß von Umgebungsreizen einem künstlichen Licht-Dunkel-Wechsel (mit Dämmerungsübergängen) einer Periode von 24 h ausgesetzt wurden. Es war den Versuchspersonen möglich, auch während der Dunkelzeit Hilfsbeleuchtungen in Küche und Bad sowie Leselampen am Bett einzuschalten. Um für die Auswertung äquidistante Meßintervalle zu erreichen, waren die Versuchspersonen sechsmal am Tag und einmal in der Nacht durch in regelmäßigen Abständen ertönende Gongsignale angehalten, Urin zu produzieren und Tests durchzuführen. Die Versuchspersonen waren darüber informiert, daß dieser Zeitgeber während des Versuchs unverändert bleiben würde. Bei allen sechzehn Versuchen dieser Art waren die circadianen Rhythmen auf die Zeitgeberperiode von 24 h synchronisiert [6, 31]. In einem Experiment dieser Art fiel gleich zu Beginn aus technischen Gründen das Gongsignal aus. Trotzdem wurde der Versuch unter sonst identischen Bedingungen fortgeführt. Überraschenderweise ergab sich, daß die Versuchsperson in ihrem Rhythmus von der Zeitgeberperiode (24,0 h) abwich. Sie hatte die Möglichkeit der Hilfsbeleuchtung ausgenützt und zeigte trotz

des Licht-Dunkel-Zeitgebers eine Freilaufperiode von ca. 25 h. Dieses Ergebnis wurde daraufhin an weiteren sieben Versuchspersonen in gleicher Weise bestätigt. Der einzige Unterschied zwischen beiden Versuchsarten besteht in den Gongsignalen, von denen ursprünglich angenommen wurde, daß sie keinen Einfluß auf die Versuchsergebnisse haben würden. Tatsächlich wurden sie aber von den Versuchspersonen als eine Art persönlicher Kontakt zum Versuchsleiter aufgefaßt, auch wenn sie sich nach einigen Tagen darüber klar waren, daß die Gongsignale wie auch der Licht-Dunkel-Wechsel elektrisch geschaltet wurden.

Aus diesen Ergebnissen wurde gefolgert, daß sozialer Kontakt in der Form der Gongsignale einen stärkeren Zeitgeber als ein reiner Licht-Dunkel-Wechsel darstellt [31]. Weiter wurde gezeigt, daß durch einen Licht-Dunkel-Wechsel mit Gongsignalen die circadianen Rhythmen des Menschen auf Perioden zwischen 23 und 27 Stunden synchronisiert werden können. Nimmt man den Versuchspersonen die Möglichkeit der Zusatzbeleuchtung während der Dunkelzeit dieses kombinierten Zeitgebers, so läßt sich zumindest für den Aktivitätsrhythmus der Bereich der Synchronisierbarkeit auf 15 bis 48 h ausdehnen. Die physiologischen Rhythmen, z.B. Körpertemperatur, bleiben jedoch nur in dem o.a. Intervall zwischen 23 h und 27 h synchronisierbar [34].

Von Wever wurden später auch Versuche durchgeführt, bei denen sich die Periode dieses kombinierten Zeitgebers von Tag zu Tag (präziser: von Zyklus zu Zyklus) entweder verkürzte oder verlängerte. Auch hier wurden die Grenzen der Synchronisierbarkeit der physiologischen Rhythmen von 23 h bzw. 27 h bestätigt [39]. Auf den Versuchsaufbau dieser Experimente soll später im Abschnitt "Methodik" noch eingegangen werden.

Aus dem bisher Angeführten geht hervor, daß Licht beim Menschen keinen wesentlichen Einfluß auf die circadiane Periodik hat. Dies gilt jedoch nur mit folgender Einschränkung: Die Lichtintensität all dieser Versuche war nie größer als 1000 lx, im Durchschnitt sogar deutlich niedriger (Kunstlicht in Räumen hat im allgemeinen Beleuchtungsstärken von einigen Hundert Lux).

Dies korrespondiert mit Untersuchungen am Menschen, die keinen Einfluß von Licht dieser Intensität auf die Melatoninsekretion gefunden haben [19]. Das in der Epiphyse produzierte Hormon Melatonin zeigt beim Tier und Menschen einen tagesperiodischen, rhythmischen Verlauf und kann so dem circadianen System zugerechnet werden. Eine Reihe von Untersuchungen an Vögeln lassen es möglich erscheinen, daß der Epiphyse und ihrem Hormon Melatonin sogar eine Schrittmacherfunktion innerhalb dieses Systems zukommt [24]. Sowohl bei tag- als auch bei nachtaktiven Tieren findet die Synthese von Melatonin fast nur nachts statt. Darüber hinaus scheint bei Tieren der Wechsel zwischen Licht und Dunkelheit für die Melatoninsynthese wesentlich zu sein:

1. Licht unterdrückt die nächtliche Melatoninausschüttung, ausreichend ist dabei eine Beleuchtungsstärke von weniger als 500 lx, nachgewiesen für Schafe und Affen [26, 28], gleichfalls genügt ein Lichtimpuls von einer Minute bei der Ratte und beim Hamster [16, 18].
2. Der Licht-Dunkel-Wechsel synchronisiert den circadianen Melatoninrhythmus, der unter Dauerdunkelheit persistiert [27]. Das weist ihn als einen endogenen circadianen Rhythmus aus.

Beim Menschen verhält sich die Melatoninsekretion ähnlich wie bei Säugetieren: Wechsel zwischen hohem Melatoninplasmaspiegel in der Nacht und sehr niedrigem während des Tages [21]. Im Gegensatz zu den Tieren war aber bei o.a. Versuchen die nächtliche Melatoninausschüttung durch herkömmliches Kunstlicht nicht zu unterdrücken. Erst Lewy prüfte den Effekt von Licht höherer Intensitäten. Er fand ab 1500 lx eine beginnende und ab 2500 lx eine vollständige Unterdrückung der nächtlichen Melatoninausschüttung [22]. Unter diesem neuen Gesichtspunkt schien es nötig, den Einfluß von Licht auf die circadiane Periodik des Menschen durch Verwendung höherer Beleuchtungsstärken (> 2500 lx) nochmals zu untersuchen.

III. VORÜBERLEGUNGEN ZUR METHODIK

Von vielen Möglichkeiten zur Prüfung des Einflusses von hellem Licht auf die circadiane Periodik des Menschen seien im folgenden drei kurz genannt:

Erstens kann man sie bei hellem Licht als Dauerbedingung untersuchen und mit Ergebnissen vergleichen, die bei herkömmlichen Dauerlicht gefunden wurden (konstante Bedingungen).

Eine zweite Möglichkeit besteht darin, daß der Proband das (helle) Licht selber schaltet (Wahlbedingungen).

Als drittes kann man helles Licht als Zeitgeber benutzen: Der Proband wird einem künstlichen Tag ausgesetzt, wobei während der Hell-Zeit helles Licht zur Beleuchtung verwendet wird (Zeitgeberbedingungen). Zum Vergleich können Daten aus früheren Versuchen mit normalem Raumlicht als Zeitgeber herangezogen werden mit der Fragestellung, ob helles Licht eine andere Zeitgeberwirkung zeigt als normales Licht.

Die circadiane Periodik des Menschen ergibt sich aus dem Zusammenwirken von internen oder endogenen Impulsen und äußeren Impulsen (Zeitgebern). Die endogenen Impulse, die den Charakter einer selbsterregten Schwingung haben, sind dafür verantwortlich, daß sich beim Menschen unter umgebungsreiz- und zeitfreien Bedingungen eine freilaufende Periodik zeigt.

Sie kann durch Einwirkung von äußeren Impulsen auf eine Länge von 24 h, aber auch auf andere Periodenlängen synchronisiert werden. Diese Synchronisierbarkeit gilt aber nur innerhalb eines bestimmten Bereiches. Seine Größe ist theoretisch abhängig vom Verhältnis der Stärke der selbsterregten Schwingung und der Stärke des Zeitgebers.

Für den Menschen ist dieser Mitnahmebereich für einen Zeitgeber bestehend aus normalem Raumlicht in Verbindung mit Gongsignalen bekannt. Er reicht von 23 h bis 27 h Periodendauer des Zeitgebers, liegt also annähernd symmetrisch um den durchschnittlichen Wert für die Freilaufperiode.

Der Mitnahmebereich wurde am genauesten in Experimenten von Wever ermittelt, die schon in der Einleitung erwähnt wurden [39]. Während im allgemeinen die Zeitgeberperiode im Verlauf eines Versuches entweder gar nicht oder nur wenige Male verändert wird, änderte sich hier die Periodenlänge des Zeitgebers von Zyklus zu Zyklus um fünf oder zehn Minuten. Bei Verkürzung der Zeitgeberperiode wurde von 24 h, bei Verlängerung von 26 h ausgegangen. Auf diese Weise konnte genau der Zyklus (und damit die Periodenlänge) ermittelt werden, ab dem der Rhythmus jeder der gemessenen Variablen nicht mehr synchronisiert verlief (fraktionierte Desynchronisation). Der Zeitgeber bestand aus einer Kombination zwischen einem Licht-Dunkel-Wechsel mit herkömmlichen Raumlicht und in regelmäßigen Abständen ertönenden Gongsignalen.

Der Einfluß von hellem Licht auf die nächtliche Melatoninausschüttung ist ein physiologischer Effekt. Helles Licht, kombiniert mit Gongsignalen, könnte daher auch ein stärkerer Zeitgeber sein als normales Licht, das die nächtliche Melatoninsekretion nicht beeinflusst. Wenn dies zutrifft, so sollte sich durch Verwendung von hellem Licht auch der Mitnahmebereich erweitern lassen.

Zur Klärung dieser Fragestellung wurde im Hinblick auf die Vergleichbarkeit mit vorhandenen Ergebnissen die gleiche Versuchsanordnung gewählt wie bei den oben erwähnten Experimenten. Der einzige Unterschied bestand darin, daß statt herkömmlichem Raumlicht Licht verwendet wurde, welches die Schwelle von 2500 lx deutlich überschritt.

IV. METHODIK

1. Versuchspersonen

Für die Versuche standen gesunde, junge Erwachsene zur Verfügung. Es handelte sich um sieben Männer, die an jeweils einem Versuch teilnahmen, und um eine Frau, mit der zwei Versuche durchgeführt wurden. Die Versuchspersonen meldeten sich auf Aushänge, Presseberichte über Versuche zur circadianen Periodik und auf Berichte von Bekannten hin, die schon an Experimenten teilgenommen hatten.

Den Versuchspersonen ist vor Versuchsbeginn bekannt, daß ein Versuch jeweils etwa vier Wochen dauert. In der Regel bringen die Interessenten genügend Arbeitsmaterial mit, um diesen Zeitraum sinnvoll zu nützen. Die Probanden erhalten pro Kalendertag nur einen geringen Betrag als Taschengeld sowie freie Verpflegung. Daraus läßt sich ersehen, daß der finanzielle Aspekt nicht im Vordergrund steht, sondern daß das Interesse an der außergewöhnlichen, weil "zeitlosen" Situation ausschlaggebend ist. Tatsächlich ergaben sich in den nunmehr über zwanzig Jahren, während derer die Versuche zur circadianen Periodik des Menschen am Max-Planck-Institut in Andechs durchgeführt wurden, nie nennenswerte Probleme, genügend Probanden zu finden.

Die Versuchspersonen wurden vor und nach dem Versuch gewogen. Sie wurden zu Beginn und am Ende des Versuchs einmal durch einen Fragebogen und zum zweiten durch ein ausführliches Gespräch über Versuchssituation und -ablauf unterrichtet bzw. befragt. Mit Hilfe folgender Testverfahren wurden auch psychologische Persönlichkeitsdaten jeweils vor und nach dem Versuch gewonnen:

- a) F P I , Freiburger Persönlichkeitsinventar, Halbformen A und B, von Fahrenberg und Selg [11]
- b) V E L A , Fragebogen zur Vegetativen Labilität, von Fahrenberg [10]
- c) E.N.NR., Fragebogen zur Extraversion, Neurotischen Tendenz und Neurotischen Rigidität, von Brengelmann [9]
- d) Östberg, Morgentyp / Abendtyp-Fragebogen [25]

2. Versuchsraum

Alle Versuche wurden in der unterirdischen Isolierstation des Max-Planck-Instituts in Andechs durchgeführt. Die Versuchspersonen leben ohne persönlichen Kontakt mit der Außenwelt in einem schall- und lichtisolierten, vollklimatisierten Raum, der im Grundriß in etwa einem Ein-Zimmer-Appartement entspricht: Wohn-Schlaf-Bereich, kleine Küche, Dusche mit WC. Alles ist zweckmäßig eingerichtet, auch eine Stereoanlage (ohne Radio) ist vorhanden. Die Raumtemperatur und die Luftfeuchtigkeit wird durch die Klimaanlage auf dem von der Versuchsperson eingestellten Wert konstant gehalten und fortlaufend registriert. Die Verbindung zum Vorraum, in dem die Registrierapparaturen untergebracht sind, besteht aus einem kleinen Schleusenraum mit zwei elektromagnetisch gegeneinander verriegelten Türen, die verhindern sollen, daß sich Proband und Versuchsleiter in der Schleuse begegnen. Sie dient zur Ver- und Entsorgung. Die Versuchsperson deponiert dort in einem Kühlschrank ihren Urin oder hinterlegt schriftliche Mitteilungen, z.B. ihre Lebensmittelbestellung. Der Versuchsleiter

betrifft in der Regel einmal pro Tag die Schleuse, um die Urine zur Analyse abzuholen oder gewünschte Dinge abzustellen. Das Öffnen und Schließen beider Türen wird auf einem Schreiber registriert.

Die Versuchsperson ist nicht eingeschlossen. Sie weiß, daß sie jederzeit den Raum durch die Schleuse verlassen kann, indem sie erst die eine Tür öffnet und dann wieder schließt und danach die andere, die ja jetzt nicht mehr verriegelt ist. Dies ist aus psychologischen Gründen nötig: Jede Form von Streß und psychischem Druck soll vermieden werden. Aus diesem Grund gibt es auch keine optische und akustische Überwachung. Als Ersatz sind unter dem Teppichboden des Versuchsraumes Kontaktplatten plaziert, die über Zeitmarkenschreiber die lokomotorische Aktivität der Versuchsperson erfaßbar machen. Auch im Bett befinden sich entsprechende Bewegungsaufnehmer. Ebenfalls registriert wird die Benutzung von elektrischen Verbrauchern (z.B. Herd, Stereoanlage) durch die Versuchsperson. Auf einem Tableau bestätigt sie folgende immer wiederkehrende Vorgänge durch Drücken entsprechender Knöpfe: Urin, Stuhlgang, Mahlzeit, Mittagsschlaf, Sport, Tagesbeginn und Tagesende. Diese Knopfdrücke werden im Vorraum registriert.

Zur Übermittlung der in der Einleitung erwähnten Gongsignale befindet sich im Versuchsraum ein Gong, der von außen manuell oder durch ein Schaltband betätigt werden kann.

Gewisse Probleme bereitete die für die Untersuchung gewünschte Beleuchtungsstärke von über 2500 lx während der Hellzeit des Zeitgebers. Bisher konnten im Versuchsraum nur Beleuchtungsstärken bis knapp über 1000 lx erreicht werden. Selbst für diese im Vergleich zum Tageslicht geringe Beleuchtungsstärke (im Freien gemessenes Sonnenlicht hat eine Beleuchtungsstärke von über

50 000 lx) sind in dem Versuchsraum (ca. 25 m^2) 54 Leuchtstoffröhren (40 Watt) nötig. (Außerdem sind noch 36 60-Watt-Glühlampen installiert.) Die genannten Leuchtkörper befinden sich über einem Himmel aus Plexiglas direkt unter der Decke. Mit Hilfe von zwei Quecksilberdampflampen à 500 Watt war es möglich, zumindest in einem Bereich von ca. 5 m^2 um den Schreib- und Eßtisch eine Beleuchtungsstärke von 3000 lx (gemessen in Tischhöhe) zu erzielen. Die beiden Lampen waren unterhalb des Plexiglashimmels angebracht. Mit dieser Versuchsanordnung wurden drei Versuche durchgeführt (V 269, V 270, V 272).

Da zum einen das Licht der Quecksilberdampflampen durch seine unausgewogene spektrale Zusammensetzung für das menschliche Auge etwas unangenehm wirkt und zum anderen die Ergebnisse dieser drei Versuche eine Weiterführung der Versuchsreihe nahelegten, wurde bei den folgenden Versuchen eine zwar finanziell aufwendigere, aber effektivere Beleuchtungsmethode angewandt: Über dem Schreibtisch wurde statt der beiden Quecksilberdampflampen (Maße : je $20 \times 30 \text{ cm}$) eine Lichtwanne (Maße: $1,50 \times 2,50 \text{ m}$) angebracht. Sie ist innen verspiegelt und mit zwölf Leuchtstoffröhren neuerer Art bestückt (Länge $1,20 \text{ m}$, 60 Watt). Diese Leuchtstoffröhren vom Hersteller "Duro Test" zeichnen sich durch einen hohen Wirkungsgrad und durch ein dem Tageslicht sehr ähnliches Spektrum aus. Mit dieser Lichtwanne wurden auf einer Fläche von ca. 8 m^2 fast 4000 lx (gemessen in Tischhöhe) erzielt. Im Hinblick auf spätere Versuche mit hellem Dauerlicht wurde auch eine neue Klimamaschine mit höherer Kühlleistung installiert. Immerhin beträgt die installierte Leistung der Beleuchtungskörper insgesamt über 5 kW, von der Versuchsperson benutzte Verbraucher (wie z.B. der Kochherd) kommen noch hinzu.

3. Versuchsplan

In allen Versuchen waren die Versuchspersonen einem künstlichen Tag ausgesetzt. Bezogen auf einen 24-h-Tag war es 18 h hell und 6 h dunkel. Die helle Phase beginnt mit einer simulierten Dämmerung von 35 Minuten Dauer. In dieser Zeit erreichen die Glühlampen ihre volle Lichtleistung allmählich mit Hilfe eines durch einen Elektromotor angetriebenen Stelltransformators. Fünf Minuten, nachdem die Glühlampen ganz hell geworden sind, wird ein Drittel der Leuchtstoffröhren, die sich über dem Plexiglashimmel befinden, eingeschaltet. 15 Minuten danach werden schließlich die restlichen Leuchtstoffröhren und die Lichtwanne bzw. die Quecksilberdampflampen (V 269, V 270, V 272) eingeschaltet. Von Beginn der Dämmerung bis zur vollen Helligkeit vergehen somit 55 Minuten. Am Ende der hellen Phase erlöschen die Lampen in umgekehrter Reihenfolge.

Sechsmal am Tag und einmal in der Nacht ertönt ein Gongsignal, das die Versuchsperson dazu auffordert, die Blase zu entleeren und einige Tests durchzuführen (Dauer ca. 30 min). Für den Nachtgong steht am Schreibtisch eine schwache Hilfsbeleuchtung (20 Watt) zur Verfügung. Die Gongsignale sind regelmäßig über den Tag verteilt. Bezogen auf einen 24-Stunden-Tag beträgt der Abstand von Gong zu Gong drei Stunden. Um den Schlaf der Versuchsperson nicht mehr als nötig zu stören, ertönt während der Dunkelzeit nur ein Gongsignal. Dadurch ergeben sich um den Nachtgong zwei Zeitintervalle von je 4,5 h.

Bei Veränderung der Periodenlänge dieses kombinierten Zeitgebers aus einem Licht-Dunkel-Wechsel und Gongsignalen blieb das Verhältnis von Hellzeit zu Dunkelzeit konstant. Die Abstände zwischen den Gongsignalen

veränderten sich proportional zur Periodenlänge. Die Dämmerungsübergänge blieben gleich.

Alle Lichtschaltungen und Gongsignale werden durch eine Schaltuhr mittels Schaltband gesteuert.

Im folgenden sollen Bedingungen und der Fahrplan aller Versuche kurz beschrieben werden (siehe Tabelle 1).

In vier Versuchen (269, 270, 272, 298) verlängerte sich die Zeitgeberperiode T stetig. In drei Versuchen dieser Gruppe (269, 270, 272) betrug die Änderung $\Delta T = 10$ min pro Zyklus. Bevor die Zeitgeberperiode T das erste Mal verlängert wurde, blieb sie fünf Zyklen konstant 26:00 h. So konnte ein T von 29 h erreicht werden.

Im vierten Versuch betrug $\Delta T = 15$ min nach drei Zyklen mit $T = 26:00$ h. Nach einem Monat Versuchsdauer war ein T von über 31:00 h erreicht.

In zwei Versuchen (283, 289) verkürzte sich die Zeitgeberperiode T stetig. ΔT bezug 10 min. T verkürzte sich von Anfang an, in einem Versuch beginnend mit $T = 23:40$ h, im zweiten bei $T = 24:00$ h. Erreicht wurde ein T von 19:00 h bzw. 18:30 h.

Drei Versuche (285, 288, 294) waren in je zwei Abschnitte unterteilt. Während des einen Abschnitts wurde helles Licht, während des anderen normales Licht (Glühlampen) für den Zeitgeber verwendet. Im Versuch 285 war die Zeitgeberperiode konstant 28:00 h, in der ersten Hälfte wurde normales, in der zweiten Hälfte helles Licht verwendet.

In den beiden anderen Versuchen (288, 294) wurde mit hellem Licht als Zeitgeber begonnen. Die Zeitgeberperiode verlängerte sich in der gleichen Weise wie im Versuch 298 (siehe oben). Nachdem mit dem elften Zyklus ein T von 28:00 h erreicht war, verlängerte sich die Zeitgeberperiode nicht mehr, sondern blieb konstant bei

Tabelle 1: Übersicht über die Versuchsanordnung aller Versuche

ΔT : Änderung der Zeitgeberperiode T pro Zyklus, QD: Quecksilberdampflampen,
 LW : Lichtwanne, GL: Glühlampen

Versuch	Proband	Beleuchtungsbedingung	Zeitgeberperiode T (h)	ΔT (min)	Versuchsdauer h zyklen
269	G.H. ♂	helles Licht (QD)	26 - 29	10	660 24
270	H.S. ♂	helles Licht (QD)	26 - 29	10	672 24,5
272	S.L. ♂	helles Licht (QD)	26 - 29	10	612 22,5
298	L.O. ♀	helles Licht (LW)	26 - 31:30	15	732 25,5
283	W.G. ♂	helles Licht (LW)	23:40 - 19	10	624 29
289	P.F. ♂	helles Licht (LW)	24 - 18:30	10	744 34,5
288	L.O. ♀	helles Licht (LW) normal.Licht (GL)	26 - 28 28	15 -	410 15 350 12,5
294	T.K. ♂	helles Licht (LW) normal.Licht (GL)	26 - 28 28	15 -	438 16 392 14
285	P.P. ♂	normal.Licht (GL) helles Licht (LW)	28 28	- -	280 10 266 9,5

28:00 h. Nach weiteren vier (V 288) bzw. fünf (V 294) Zyklen wurde das helle Licht durch normales Licht ersetzt. Der Versuch 288 dauerte dann noch 12,5 Zyklen, der Versuch 294 14 Zyklen.

4. Meßgrößen

a) Rektaltemperatur

Die Rektaltemperatur wurde bei allen Versuchen fortlaufend registriert. Dazu wird von den Versuchspersonen ein flexibles, elektrisches Widerstandsthermometer tief rektal eingeführt. Das andere Ende des ca. 6 Meter langen Kabels (Durchmesser: 4 mm) wird in eine sich zentral unter der Decke befindliche Buchse gesteckt. Damit ist die Verbindung zu einem Temperaturschreiber im Vorraum hergestellt.

Die Versuchspersonen gewöhnen sich schnell an den Temperaturfühler, auch die Bewegungsfreiheit ist nicht wesentlich eingeschränkt.

b) Urinvariablen

Die Versuchspersonen geben alle Urine fortlaufend nummeriert in den Schleuseneisschrank, also auch solche, die sie zwischen den Gongsignalen produziert haben. Von jedem Urin wurde die Zeit der Ausscheidung registriert. Gemessen wurde das Urinvolumen und mit Hilfe eines Flammenphotometers die Konzentration der Elektrolyte Natrium, Kalium und Calcium.

c) Aktivität

Wie schon erwähnt, wurde die lokomotorische Aktivität durch Fußboden- und Bettkontakte registriert. Außerdem zeigt die Versuchsperson durch Knopfdruck ihren Tagesbeginn und ihr Tagesende an. So läßt sich zu jedem Zeitpunkt zwischen Schlaf- und Wachzustand unterscheiden. Beide Zustände sind auch nach quantitativen Kriterien untersuchbar.

d) Psychologische Variablen

Jeweils zum Gongsignal führen die Versuchspersonen verschiedene psychologische Tests durch. Für folgende Items wird vom Probanden die subjektive Einschätzung des augenblicklichen Zustandes angegeben: Zufriedenheit, Bedürfnis nach körperlicher Aktivität, Bedürfnis nach geistiger Aktivität, Müdigkeit, Nervosität und Konzentrationsfähigkeit. Die Einstufung erfolgt mit einem senkrechten Strich durch eine waagrechte Linie (Länge: 9 cm), die für jedes Item von "sehr groß" bis "gar nicht" reicht. Außerdem wurden verschiedene Buchstabentests zur Erfassung der augenblicklichen Konzentrations- und Leistungsfähigkeit angewandt. Es seien hier nur der SAM (Search and memory)-Test von Folkard [12] und der E-Durchstreichetest erwähnt.

Am Abend jedes (subjektiven) Tages legen die Versuchspersonen die Testunterlagen, einen Tagesbericht und ein Protokollblatt über den Tagesablauf in die Schleuse. Diese Unterlagen und auch die im Eisschrank gesammelten Urine werden während der Nacht des Probanden vom Versuchsleiter abgeholt. So ist er während des ganzen Versuches immer über das Befinden der Versuchsperson orientiert.

Im Mittelpunkt dieser Arbeit stehen die Variablen Körpertemperatur und Aktivität. Übersichtsweise sollen auch die Ergebnisse der Urinuntersuchungen abgehandelt werden. Die psychologischen Variablen waren nicht für alle Versuchspersonen einheitlich (Ausnahme war die Selbsteinstufung, mit deren Hilfe das Befinden der Versuchsperson jederzeit zu überprüfen war). Eine der wesentlichen Funktionen der psychologischen Tests für diese Versuchsreihe war, daß die Versuchspersonen zu ihrer Durchführung ca. 30 Minuten pro Gong am Schreibtisch dem hellen Licht ausgesetzt waren, ohne daß sie ausdrücklich darauf hingewiesen werden mußten. Der rhythmische Verlauf der Testergebnisse ist zwar sicherlich interessant, wird aber - auch wegen der Uneinheitlichkeit der Variablen - nicht in dieser Arbeit abgehandelt.

5. Behandlung der Meßwerte

a) Rektaltemperatur

Die von einem Mehrfachsreiber fortlaufend registrierte Rektaltemperatur lag in einminütigen Werten vor. Für die Analyse wurden Halbstundenwerte verwendet. Man erhält so einen vernünftigen Umfang der Zeitreihe. Die Aussagekraft der Analysenergebnisse läßt sich durch ein engeres Datenraster nicht mehr merklich steigern.

b) Urinvariablen

Für jeden Urin ist der Zeitpunkt der Abgabe und somit der Abstand zum vorhergehenden Urin bekannt. Gemessen wird einerseits das Volumen und andererseits flammenphotometrisch die Konzentration der Elektrolyte Na, K

und Ca. Da die Zeitintervalle zwischen den Urinabgaben bekannt sind, können das Volumen und die Konzentration der Elektrolyte jedes Urins in die Menge der Ausscheidung pro Stunde (ml/h bzw. mmol/h) umgerechnet werden. So erhält man für diese vier Variablen eine Zeitreihe, die jedoch nicht äquidistant vorliegt. Da dies für die in dieser Untersuchung angewandte Periodenanalyse nötig ist, wurden die Werte der Urinvariablen mit Hilfe der Flächeninterpolation in Halbstundenwerte umgerechnet.

Die oben erwähnte Umrechnung in die Menge der Ausscheidung pro Stunde ist deshalb zulässig, weil man die menschliche Blase als einen Integrator über die Zeit betrachten kann. Dieses Vorgehen läßt sich in der gleichen Form z.B. für psychologische Variablen nicht anwenden, da ihre Meßwerte einen augenblicklichen Zustand widerspiegeln.

c) Aktivität

Auch für die Analyse der Variablen Aktivität wurde eine Zeitreihe verwendet. Der Abstand der Daten betrug ebenfalls eine halbe Stunde. Als Basis für die Erstellung dieser Zeitreihe dienten die durch Knopfdruck von der Versuchsperson angegebenen Anfänge von Ruhezeit und Aktivität. Dabei wird der Aktivität die Eins und der Ruhe die Null zugeordnet, so daß sich eine Treppenfunktion ergibt. Die subjektiv von der Versuchsperson angegebenen Zeiten für Ruhen und Wachen wurden selbstverständlich anhand der Registrierung der lokomotorischen Aktivität auf ihre Objektivität überprüft.

d) Psychologische Tests

Die vor und nach dem Versuch durchgeführten psychologischen Tests wurden nach den Richtlinien ihrer Autoren ausgewertet. Die erhaltenen Zahlenwerte wurden mit bekannten Verteilungen verglichen. Die Selbsteinschätzung wurde vom Versuchsleiter jeden Tag eingesehen. Sie diente, wie schon erwähnt, vor allem der Orientierung über den psychischen und emotionalen Zustand der Versuchspersonen.

6. Auswertung der Daten

Die erhaltenen Meßdaten lagen nun in äquidistanten Zeitreihen vor (Datenabstand 0,5 h). Das Ziel der angewandten Rechenverfahren bestand darin, die vorherrschende Periode, die Amplitude und die Phase der Rhythmen der verschiedenen Variablen zu ermitteln. Zur ersten Orientierung wurden die Daten aufgeplottet (Beispiel: Abb. 1).

Als nächstes wurden die einzelnen Variablen einer Periodenanalyse unterzogen und das erhaltene Periodenspektrum gezeichnet.

Die Periodenanalyse soll im folgenden kurz beschrieben werden. Nach Errechnung von Mittelwert und Standardabweichung aller Daten (SD-G) wird die äquidistante Datenreihe durch vorgegebene Periodenlängen (i.a. von 16,0 h bis 36,0 h, Schrittweite 0,1 h) in entsprechend viele "Zyklen", diese wiederum in 24 äquidistante Klassen unterteilt. Dann werden die Einzelzyklen übereinandergeklappt und klassenweise aufsummiert. Für jede Klasse läßt sich dann der Mittelwert und die Standardabweichung der in dieser Klasse enthaltenen Daten errechnen.

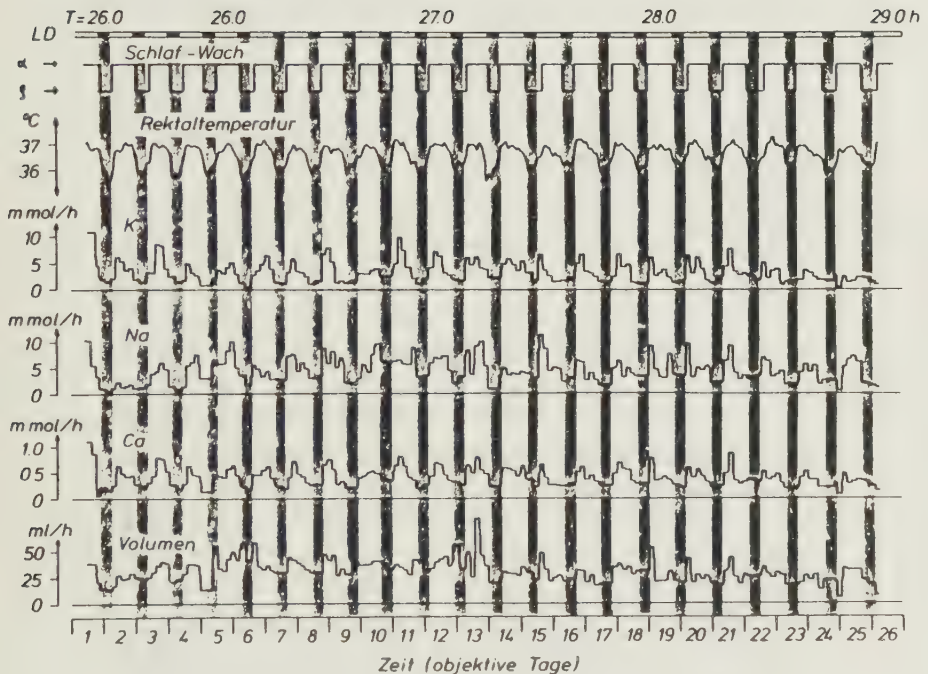


Abb. 1: Periodik der VP 272 unter hellem Licht als Zeitgeber mit sich stetig verlängernder Zeitgeberperiode (oberer Balken), als senkrechte, dunkle Streifen die Dunkelzeit des Zeitgebers. Dargestellt ist der zeitliche Verlauf von Schlafen (β) und Wachen (α), Rektaltemperatur und vier Urinvariablen.

Die 24 Klassenmittelwerte ergeben dann einen gemittelten oder mittleren Zyklus für die jeweils vorgegebene Periode. Mit der Harmonischen Analyse (Sinusanpassung) werden Phase und Amplitude des mittleren Zyklus berechnet.

Die Varianz der gesamten Zeitreihe setzt sich aus einem Anteil zufallsbedingtem Rauschen und einem möglichen Rhythmik-Anteil (Reliabilität) zusammen. Der Rauschanteil ergibt sich aus dem Mittel der Standardabweichungen innerhalb der einzelnen Klassen (SD-M), der Rhythmik-Anteil aus der Standardabweichung aller Klassenmittelwerte (SD-P), wenn SD-M und SD-P jeweils relativ zur Gesamtstreuung (SD-G) angegeben werden. Das Verhältnis $\frac{SD-P}{SD-G}$ ist der Rhythmik-Anteil oder die Reliabilität. Bei Berechnung der Größe des Rhythmik-Anteils (Reliabilität) für jede der vorgegebenen Periodenlängen ergibt sich das o.g. Periodenspektrum. Eine Reliabilität von 100 % würde bedeuten, daß die Zeitreihe nur periodische Anteile enthält und kein zufallsbedingtes Rauschen.

Die Signifikanz des für die Reliabilität eines Rhythmus erhaltenen Prozentwertes hängt natürlich auch davon ab, wieviele Perioden in der Zeitreihe enthalten sind und wieviele Meßpunkte pro Periode vorliegen. Je länger eine Zeitreihe ist und je dichter die Meßpunkte beieinander liegen, desto signifikanter ist der gefundene Wert für die Reliabilität. Um die Reliabilität von Rhythmen verschieden langer Zeitreihen oder von Rhythmen verschiedener Periodenlänge innerhalb einer Zeitreihe vergleichen zu können, wird eine Normierung durchgeführt, bei der man sich auf eine circadiane Standardzeitreihe von 25 Perioden pro Zeitreihe und 24 Meßpunkten pro Periode bezieht. Jeder nach dieser Normierung gefundene Prozentwert > 30 % für die Reliabilität besagt nun, daß der Zeitreihe ein Rhythmus mit

einem Signifikanzniveau von $p = 0,0001$ zugrunde liegt. Für den in der spektralen Darstellung vorherrschenden Periodenwert wird ein gemittelter Kurvenverlauf gezeichnet. Ein Beispiel für die kombinierte Darstellung von Spektrum und gemitteltem Verlauf ist die Abb. 3 (S. 45). Wie schon erwähnt, wurde durch Sinuusanpassung für diesen Wert auch Phase und Amplitude berechnet. Mit Hilfe der Harmonischen Analyse läßt sich auch die Acrophase jedes Einzelzyklus ermitteln. Als Raster wird dabei wieder die in der Periodenanalyse vorherrschende Periode verwendet (Beispiel: Abb. 5).

Bei Versuchen mit sich regelhaft veränderndem Zeitgeber und unter der Annahme, daß die Rhythmen - zumindest eine Zeitlang - synchron zum Zeitgeber verlaufen, ergeben sich gewisse Probleme bei der Analyse der gewonnenen Daten. Die oben beschriebenen Rechenverfahren bilden nämlich nur Rhythmen konstanter Periodenlänge im Spektrum scharf ab. Ein synchron zum sich verändernden Zeitgeber verlaufender Rhythmus würde im Periodenspektrum als verwischter Peak zur Darstellung kommen, da ja jedem Zyklus ein anderes T bzw. τ zugrunde liegt. Trotzdem liegt aber ein rhythmischer Verlauf vor.

Um dieses Problem zu umgehen, wurden die Datenreihen für die Analyse in der Form verwendet, daß für jeden Zeitgeberzyklus immer 48 Daten vorhanden waren (für einen Zyklus mit der Zeitgeberperiode $T = 24$ h sind das Halbstundenwerte). Die Zeitreihe wird also nicht in äquidistante Zyklen, sondern in Zeitgeberzyklen unterteilt. Im Spektrum ist dann die vorherrschende Periode nicht als absolute Periode in Stunden, sondern als Periode relativ zum Zeitgeber abgebildet.

Ist eine Variable vom Zeitgeber synchronisiert, so durchläuft sie pro Zeitgeberzyklus mit 48 Daten ein Minimum und ein Maximum, und es ergibt sich in der

spektralen Darstellung ein Peak beim Wert 1,0, der genau der Periodenlänge des Zeitgebers entspricht. Daß dieses Verfahren praktikabel ist, zeigt unter anderem ein Vergleich vom Mittelwert und Standardabweichung der absoluten und der relativierten Zeitreihen der Körpertemperatur für alle Versuche (Tabelle 2).

Tabelle 2: Gleichwerte (MW) mit Standardabweichungen (SD) der Variablen Rektaltemperatur jeweils für absolute und für relativierte Zeitreihen. Der Versuch 285 hatte einen Zeitgeber von konstant 28:00 h, daher war keine Relativierung nötig.

Versuch Nr.	MW + SD unveränderte ZR	MW + SD relativierte ZR	Differenz MW	Differenz SD
269	36,848 $\pm$ 0,274	36,845 $\pm$ 0,279	0,003	0,005
270	36,722 $\pm$ 0,344	36,720 $\pm$ 0,346	0,002	0,002
272	36,520 $\pm$ 0,395	36,516 $\pm$ 0,394	0,004	0,001
283	36,955 $\pm$ 0,348	36,958 $\pm$ 0,346	0,003	0,002
285	36,972 $\pm$ 0,364	-	-	-
288	37,031 $\pm$ 0,373	37,037 $\pm$ 0,378	0,006	0,005
289	36,881 $\pm$ 0,333	36,878 $\pm$ 0,324	0,003	0,009
294	36,779 $\pm$ 0,293	36,781 $\pm$ 0,299	0,002	0,006
298	36,979 $\pm$ 0,396	36,978 $\pm$ 0,405	0,001	0,009
Mittel- wert	36,854 $\pm$ 0,161			

V. ERGEBNISSE

1. Persönlichkeitsdaten

Eine Übersicht über persönliche und psychologische Daten gibt die Tabelle 3. Unter der jeweiligen Versuchsnummer findet sich der Zeitraum des Experiments, Alter, Geschlecht und Gewicht der Probanden und die Ergebnisse der psychologischen Tests VELA, E.N.NR. und Östberg. Für das Körpergewicht und für die Tests VELA und E.N.NR. sind jeweils die Werte "vor" und "nach" dem Versuch aufgelistet. Für diese Wertepaare wurde der t-Test und der Wilcoxon-Test für verbundene Stichproben gerechnet. In keinem Fall war ein statistisch signifikanter Unterschied nachzuweisen. Beim Körpergewicht wurden nur die Ergebnisse der männlichen Versuchspersonen zur Berechnung herangezogen. Das Durchschnittsalter der Versuchspersonen betrug $25,00 \pm 5,95$ Jahre, der jüngste war Schüler, alle anderen Studenten, auch die beiden mit je 35 Jahren ältesten Probanden.

Beim Ergebnis des VELA gibt Fahrenberg für seine Stichprobe einen MW von $18,98 \pm 9,57$ (SD) an. Das Ergebnis der Bunkerprobanden ist praktisch identisch mit diesem Vergleichswert (siehe Tab. 3).

Auch beim Ergebnis des E.N.NR. liegen die Ergebnisse innerhalb einer Standardabweichung um die von Brengelmann angegebenen MW. Lediglich beim Faktor Neurotische Rigidität (NR.) sind die Versuchspersonen weniger rigide als eine Vergleichsstichprobe von Deutschen, deken sich jedoch im Ergebnis mit einer englischen Stichprobe.

Tabelle 3: Persönlichkeitsdaten und Daten der psychologischen Tests aller Versuchspersonen
(siehe auch Text), MT: Morgentyp, AT: Abendtyp, ID: Indifferenttyp

V	Zeitraum	Alter Geschlecht	Gewicht kg vor nach	VELA vor nach	E.	N. vor	NR.	E.	N. nach	NR.	öst- berg
269	3.82	35 o	79,0 79,0	12 17	20	12	4	12	20	8	65 MT
270	4.82	22 o	68,8 69,0	25 35	26	38	16	24	38	12	36 AT
272	5.82	18 o	60,3 60,8	17 14	27	5	13	22	9	8	45 IT
283	3.83	35 o	100,0 98,4	22 17	6	18	24	4	19	24	39 AT
285	4.83	23 o	66,4 67,0	14 19	17	16	20	18	24	30	56 IT
288	6.83	23 ♀	60,0 58,4	27 28	22	34	18	22	32	18	39 AT
289	7.83	21 o	66,4 66,8	22 26	4	24	17	3	22	15	60 MT
294	10.83	24 o	65,7 66,1	9 13	23	8	18	24	10	26	49 IT
298	12.83	24 ♀	64,5 61,2	26 23	20	30	20	23	31	17	48 IT
ohne 288 u. 298											
Mittelwert	25,00		72,37 72,44	19,33 21,33	18,33	20,56	16,67	16,89	22,78	17,56	48,56
und Standard- abweichung	$\pm$ 5,96		$\pm$ 13,43	$\pm$ 6,56	$\pm$ 7,26	$\pm$ 8,17	$\pm$ 11,65	$\pm$ 8,48	$\pm$ 9,76	$\pm$ 7,81	$\pm$ 10,06

t-Test und Wilcoxon-
Test für verbundene
Stichproben

n.s. n.s.

n.s.

-

Östberg findet für seinen Fragebogen in seiner Stichprobe im Mittel einen Wert, der dem Indifferenztyp entspricht (Punktzahlen von 42 bis 58). Dieses Ergebnis ergibt sich auch in der hier befragten Stichprobe: Etwa gleich viel Abendtypen und Morgentypen, allerdings im Verhältnis etwas mehr Indifferenztypen als bei Östberg.

In der Literatur finden sich Hinweise auf hohe Korrelationen zwischen dem FPI und dem E.N.NR., sowie dem Neurotizismus-Faktor des E.N.NR. und dem VELA [11]. Auch in der Stichprobe dieser Arbeit bestehen teilweise hochsignifante Korrelationen zwischen den erwähnten Tests. Berechnet wurden sie mit Hilfe der parametrischen Korrelationen r und der nichtparametrischen Rangkorrelation nach Spearman R . Für die Korrelation zwischen der N-Skala des FPI und der N.-Skala des E.N.NR. wurden folgende Werte berechnet (jeweils vor und nach dem Versuch, ohne V 272, da für diesen Versuch kein FPI-Ergebnis vorlag):

Vorher	:	$r = 0,814$	$(p < 0,05)$	$R = 0,649$	$(p < 0,1)$
Nachher	:	$r = 0,852$	$(p < 0,01)$	$R = 0,881$	$(p < 0,01)$

Für die Korrelation zwischen VELA und Skala N. des E.N.NR. fand sich folgendes Ergebnis (jeweils vor und nach dem Versuch, mit V 272):

Vorher	:	$r = 0,851$	$(p < 0,01)$	$R = 0,846$	$(p < 0,02)$
Nachher	:	$r = 0,904$	$(p < 0,001)$	$R = 0,929$	$(p < 0,01)$

Die von den Probanden vor und nach dem Versuch ausgefüllten, allgemein gehaltenen Fragebögen wurden nach den Kriterien Motivation, Versuchsablauf, Zufriedenheit mit der Versuchssituation u.ä. durchgesehen.

Die meisten Versuchspersonen kamen zu diesem Test, weil sie an der besonderen und neuen Situation des Versuchs an sich interessiert waren und die Zeit zum Lernen und Arbeiten nutzen wollten. Zwei Versuchspersonen (285, 289) lag noch mehr daran, ungestört zu sein und spontan ihren Interessen nachgehen zu können; Lernen stand bei ihnen nicht im Vordergrund. Von zwei Versuchspersonen wurde auch der Wunsch, sich selbst kennenzulernen, angeführt (270, 289).

Von vier Probanden wurde der Versuch als teilweise belastend empfunden (269, 270, 285, 294), andererseits war es keinem der Teilnehmer irgendwann einmal langweilig. Dem entspricht, daß auch nur zweien der Gedanke an einen Abbruch des Versuchs kam (270, 283), ohne daß sie diesen jedoch ernstlich erwogen haben.

Positiv empfunden wurde die Einsamkeit (270, 285, 294), die Möglichkeit, ungestört zu arbeiten (270, 272, 283, 285, 288, 298) und die Versorgung mit Lebensmitteln (alle). Negativ beurteilt wurde von einem Probanden das helle Licht (269) und von zwei anderen das Geräusch der Klimaanlage (270, 283). Über Schlafstörungen klagte trotz des Nachtgongs niemand, zwei Teilnehmer berichteten ausdrücklich über einen besonders guten Schlaf (269, 270).

Zusammenfassend kann gesagt werden, daß sich die Versuchspersonen in der neuen Situation recht schnell und gut zurechtfinden und sie in der Regel als positiv empfanden. Dies spiegelt auch die Beantwortung der Frage wider, ob sie einen solchen Versuch nochmals mitmachen würden:

Nur ein Proband (285) wollte kein zweites Mal kommen, alle anderen bejahten die Frage. Tatsächlich hat eine Versuchsperson innerhalb eines Jahres an zwei Versuchen teilgenommen (288, 298).

Ein wichtiger Punkt des Fragebogens "nach dem Versuch" ist die Frage nach der subjektiven Einschätzung des im Experiment gegebenen künstlichen Tags, der in seiner Länge bei keinem Versuch dem natürlichen 24 h-Tag entsprach. Einige Versuchspersonen bemerkten zwar, daß ihr Tag länger oder kürzer war als der gewohnte 24 h-Tag, nicht jedoch die allmähliche Veränderung der Zeitgeberperiode T von Zyklus zu Zyklus. Auch die Größe der Abweichung von 24 h-Tag konnte nicht exakt eingeschätzt werden, eine Versuchsperson (288) täuschte sich auch qualitativ: Die Zyklen in ihrem Versuch verlängerten sich bis zu einem $T = 28:00$ h. Sie meinte jedoch, einem künstlichen Tag unterworfen gewesen zu sein, der kürzer als 24 h war.

2. Aktivität

In den Abbildungen 2 a-i sind die Ergebnisse der Aktivitätsperiodik aller neun Versuche graphisch dargestellt. Während in der Abbildung 1 die Schlaf-Wach-Periodik auf einer fortlaufenden Zeitachse durch eine Rechteckfunktion erkennbar ist, wurden in den Abbildungen 2 a-i zwei Zeitachsen verwendet. Die eine hat als Dimension die Zeit in Stunden, die andere die Zeit in Zyklen. Auf diese Weise fällt die Abweichung von einer 24 h-Periodik besser ins Auge als in der Abbildung 1, die wiederum den Vorteil hat, den rhythmischen Verlauf von Rektaltemperatur und Urinvariablen anschaulich zu machen.

In der Tabelle 4 findet sich eine Übersicht über den Anteil der Wachzeit für jeden Versuch. Für die Versuche 288, 294 und 285 ist der Wert jeweils für die Abschnitte mit hellem und normalem Licht als Zeitgeber angegeben, auch die Versuche 269 und 283 sind in zwei

Hälften unterteilt. Im zweiten Teil trat Desynchronisation zwischen Aktivitäts- und Temperaturperiodik auf. Außerdem finden sich die Prozentwerte der Reliabilität für die Schlaf-Wach-Periodik, wie sie in der Periodenanalyse für die vorherrschende Periode errechnet wurde.

In den Abbildungen 2 a-i ist neben der Aktivitätsperiodik (Schlafen: helle Balken, Wachen: schwarze Balken) die zeitliche Lage der Minima und Maxima der Rektaltemperatur in Form von schwarzen Dreiecken angegeben.

Weißer Dreiecke sind zeitlich korrekte Doppeldarstellungen von schwarzen Dreiecken, wenn der Zustand der Desynchronisation zwischen Aktivitäts- und Rektaltemperaturrhythmus aufgetreten ist (z.B. Abb. 2 a und e).

Die Dunkelzeiten des Zeitgebers werden als schraffierte Bänder sichtbar, die zugehörige Zeitgeberperiode T ist jeweils angegeben (siehe auch Legende zu Abb. 2 a).

Aus den Balkendarstellungen wird als erstes erkennbar, daß alle Versuchspersonen mit ihrer Aktivitätsperiodik dem Zeitgeber gefolgt sind, was auch durch die Periodenanalyse bestätigt wird. In den Abbildungen der Periodenanalyse zeigt sich für die Schlaf-Wach-Periodik in der spektralen Darstellung ein Peak an der der Zeitgeberperiode entsprechenden Stelle ($= 1,0$), sofern von relativ zum Zeitgeber verlaufenden Zeitreihen ausgegangen wurde. Für den zweiten Teil der Versuche 288 und 294 (Abb. 16 und 17) sowie für den ganzen Versuch 285 (Abb. 14) konnten der Analyse die unveränderten absoluten Zeitreihen zugrunde gelegt werden, da sich der Zeitgeber nicht änderte, sondern eine konstante Periodenlänge von $T = 28,0$ h hatte. Dementsprechend findet sich ein Peak bei diesem Wert.

Tabelle 4: Parameter der Aktivitätsperiodik (A: synchroner, B: desynchroner Verlauf von Aktivitäts- und Rektaltemperaturperiodik, HL: Helles Licht, NL: Normales Licht, oberer Teil nur helles Licht)

V-Nr.	Wachanteil (%)	Periode	Reliabilität der Periode (%)
269 A	71,1	synchron	92
269 B	67,2	zur Zeit-	77
270 A	64,4	geber-	90
272 A	61,2	periode	91
		(ZGP)	
298 A	69,3	"	91
283 A	60,5	"	82
283 B	53,3	"	63
289 A	67,0	"	95
288 HL, A	69,9	"	91
288 HL, B	70,4	"	82
294 HL, A	67,4	"	88
294 NL, B	66,5	"	77
285 HL, B	66,0	"	66
285 NL, B	63,9	"	73

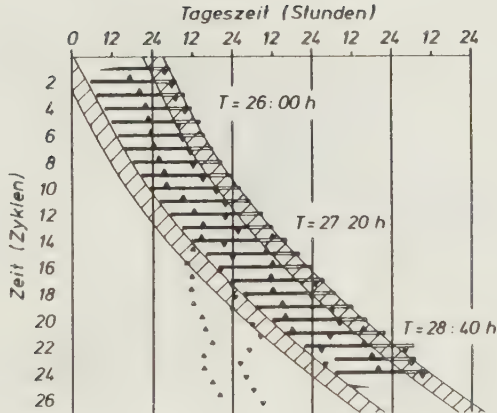


Abb. 2 a: Zeitlicher Verlauf von Aktivitäts- und Rektaltemperaturrhythmik der VP 269 unter hellem Licht als Zeitgeber. Dargestellt sind Wachen: schwarze Balken, Schlafen: helle Balken, Maxima ($\blacktriangle$) und Minima ($\blacktriangledown$) der Rektaltemperatur (helle Dreiecke sind zeitlich korrekte Doppeldarstellungen von schwarzen Dreiecken). Die Dunkelzeit des Zeitgebers ist durch Schraffur gekennzeichnet, unter T die jeweilige Periodenlänge des Zeitgebers angegeben.

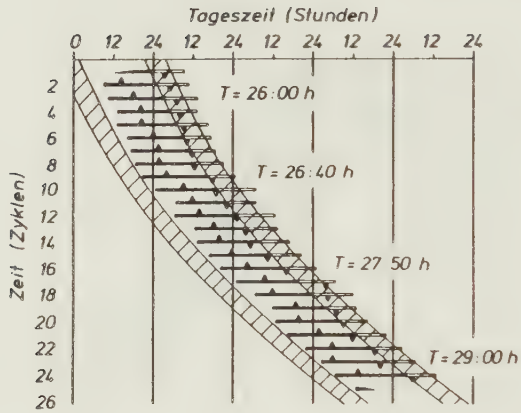


Abb. 2 b: V 270, Erläuterungen siehe Abb. 2 a

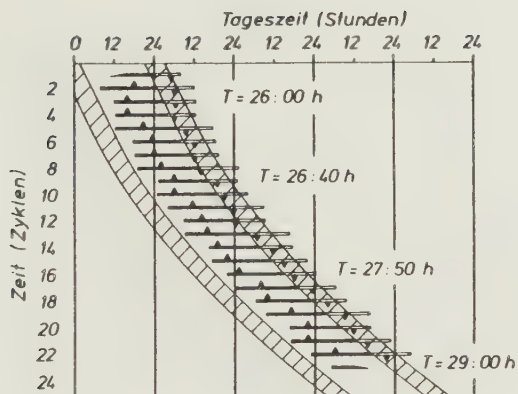


Abb. 2 c: V 272, Erläuterungen siehe Abb. 2 a

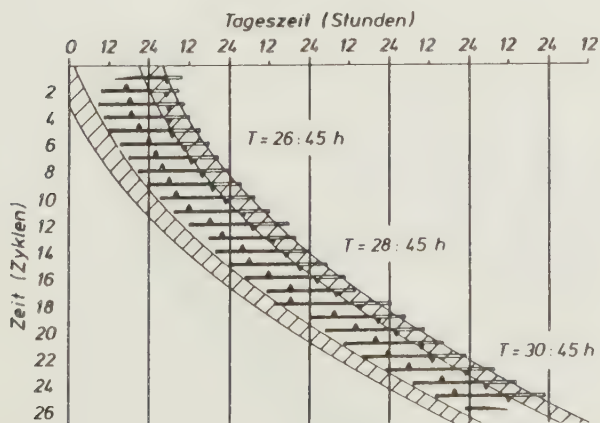


Abb. 2 d: V 298, Erläuterungen siehe Abb. 2 a

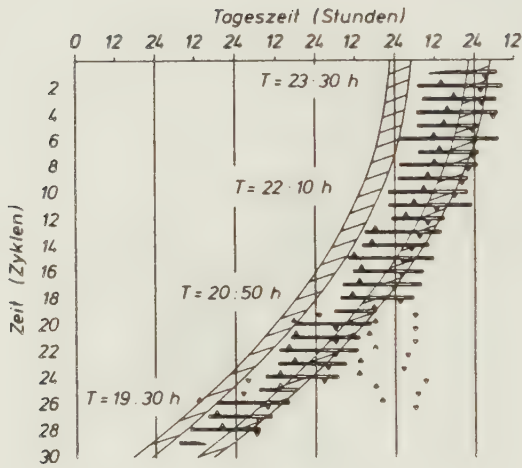


Abb. 2 e: V 283, Erläuterungen siehe Abb. 2 a

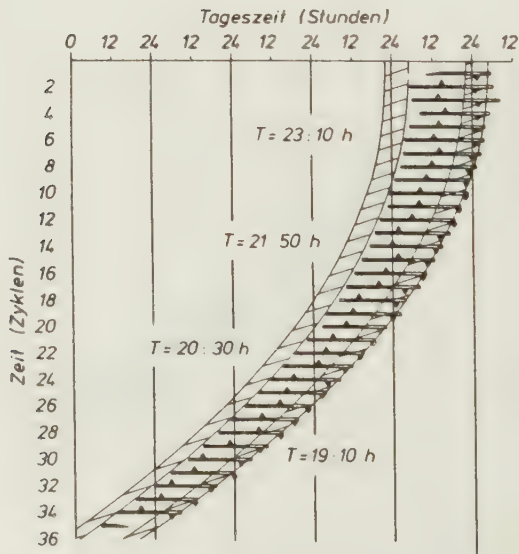


Abb. 2 f: V 289, Erläuterungen siehe Abb. 2 a

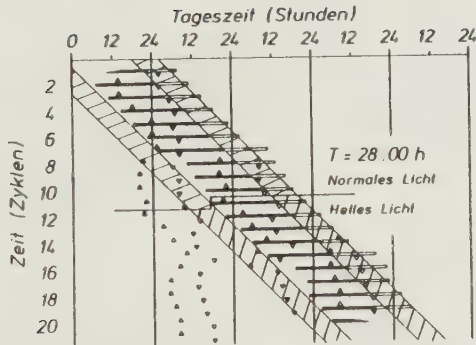


Abb. 2 g: V 285, konstante Periodenlänge des Zeitgebers mit $T = 28:00 \text{ h}$, zuerst normales, dann helles Licht als Zeitgeber, erkennbar an der unterschiedlichen Schraffur der Dunkelzeit, übrige Bezeichnungen wie in Abb. 2 a

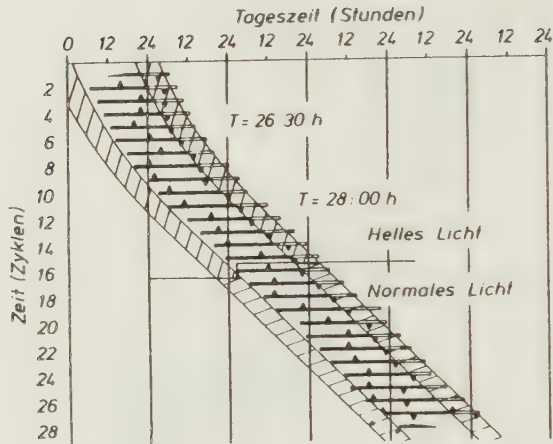


Abb. 2 h: V 288, ab Zyklus 11 konstante Periodenlänge des Zeitgebers mit $T = 28:00$ h, ab Zyklus 16 normales Licht als Zeitgeber (siehe auch Text)

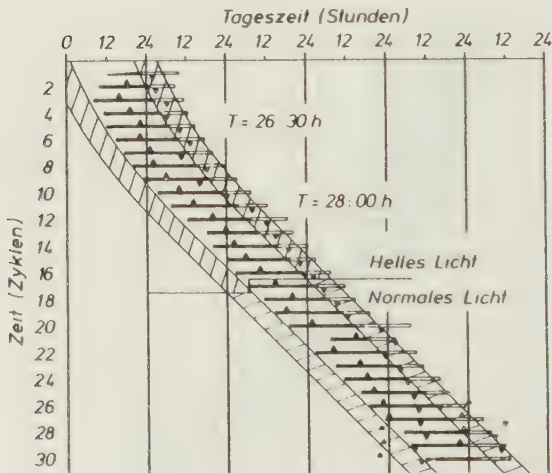


Abb. 2 i: V 294, normales Licht ab Zyklus 17, Erläuterungen siehe Abb. 2 a und 2 h

Bei den Versuchen mit Verlängerung des Zeitgebers (Abb. 2 a, b, c, d) hielten sich die Versuchspersonen bis zum Ende des Versuchs an den Zeitgeber, insbesondere der Zeitpunkt des Zubettgehens fällt sehr genau mit dem Dämmerungsbeginn zusammen. Eine größere Variabilität zeigt der Zeitpunkt des Aufstehens. Während die Versuchsperson 269 und mit wenigen Ausnahmen auch die Versuchsperson 298 in der Regel unmittelbar nach dem Hellwerden aufstanden, vergingen in den Versuchen 270 und 272 teilweise einige Stunden bis zum Tagesbeginn der Probanden. Dies spiegelt sich auch im Wach-Anteil an der Gesamtversuchsdauer wider (siehe Tab. 4).

Bei den zwei Versuchen mit Verkürzung der Zeitgeberperiode ergibt sich ein ähnlicher Unterschied. Während im Versuch 289 der Proband mit seiner Aktivität sehr genau den Dämmerungsübergängen folgte (Abb. 2 f), war dies beim Versuch 283 nicht der Fall. Von Zyklus zu Zyklus beginnt die Aktivität später, bis diese Phasenverschiebung etwa alle sechs bis sieben Zyklen durch früheres Aufstehen wieder ausgeglichen wird (Abb. 2 e). Der Wach-Anteil ist deutlich kleiner als im Versuch 289.

Auch bei den drei Versuchen, in denen ein Wechsel der Beleuchtungsbedingungen vorgenommen wurde, läßt sich für den Zeitpunkt des Zubettgehens aus den Balkendarstellungen (Abb. 2 h, i, g) eine größere Stabilität als für den des morgendlichen Aufstehens erkennen. Ein Unterschied zwischen den Versuchsabschnitten mit hellem bzw. mit normalem Licht als Zeitgeber ist für diese beiden Parameter jedoch nicht ersichtlich. Entsprechend gering ist der Unterschied der errechneten Prozentwerte des Wachanteils für beide Versuchsabschnitte (Tab. 4, unterer Teil).

Für die Reliabilität der vorherrschenden Periode ergeben sich hohe und sehr hohe Werte jeweils für die Versuche bzw. Versuchsabschnitte, in denen Aktivitäts- und Rektaltemperaturperiodik synchron zueinander verliefen, niedrigere Werte für die Versuchsabschnitte, in denen nach vorher synchronem Verlauf Desynchronisation aufgetreten war (Tab. 4: V 269, 283, 288, 294). Eine Ausnahme bildet der Versuch 285, hier liegt über den gesamten Versuch Desynchronisation zwischen Aktivität und Rektaltemperatur vor.

3. Rektaltemperatur

An den Abbildungen 2 a - i läßt sich erkennen, daß der Rektaltemperaturrhythmus, repräsentiert durch die Dreiecke, sich nicht in allen Versuchen so wie die Aktivitätsperiodik verhält. Es gibt Versuche bzw. Versuchsabschnitte, in denen die Rektaltemperatur einen vom Zeitgeber und der Aktivität unabhängigen Verlauf nimmt (interne Desynchronisation). Im folgenden sollen die Ergebnisse der Variablen Rektaltemperatur für jeden Versuch abgehandelt werden (siehe auch Tab. 5).

Verlängerung des Zeitgebers

Ein typischer Verlängerungsversuch mit der Verlängerungsrate $\Delta T = 10$ min ist der Versuch 272. In der Abbildung 2 c kann man erkennen, daß die Maxima und Minima der Rektaltemperatur bis zum Ende des Versuches dem Zeitgeber folgen. In den ersten fünf Zyklen verschieben sie sich nach vorne: Während das Maximum zu Beginn im zweiten Teil der Wachzeit und das Minimum in der zweiten Hälfte des Schlafes liegt, ist dies nach etwa fünf Zyklen nicht mehr der Fall. Beide liegen nun

Tabelle 5: Parameter der Rektaltemperaturperiodik (ZGP: Zeitgeberperiode, andere Bezeichnungen wie bei Tab. 4)

Versuchs-Nr.	Periode	Gleichwert [°C]	Amplitude [°C]	Reliabilität [%]
269 A	synchron zur ZGP	36,842	0,326	68
269 B	24,8 h	36,854	0,228	53
270 A	synchron zur ZGP	36,722	0,348	75
272 A	synchron zur ZGP	36,520	0,462	87
298 A	synchron zur ZGP	36,979	0,381	75
283 A	synchron zur ZGP	36,942	0,239	53
283 B	24,6 h	36,973	0,294	43
289 A	synchron zur: GP	36,881	0,381	80
288 HL, A	synchron zur ZGP	37,011	0,432	75
288 NL, B	24,6 h	37,054	0,200	41
294 HL, A	synchron zur ZGP	36,839	0,232	58
294 NL, B	24,4 h	36,713	0,189	43
285 HL, B	24,5 h	37,063	0,278	47
285 NL, B	24,5 h	36,883	0,359	58

in der ersten Hälfte der Wach- bzw. Schlafzeit. Dieser Zustand besteht bis zum Ende des Versuches. Der Rektaltemperaturrhythmus verläuft somit bis zu einem T = 29:00 h synchronisiert. Die Abbildung 3 zeigt das Ergebnis der statistischen Analyse. Wie schon erwähnt, wurde der Analyse eine relativierte Zeitreihe zugrunde gelegt, daher erscheint als Bestätigung für den Zustand der Synchronisation ein Peak für die Reliabilität des Rektaltemperatur- und auch des Aktivitätsrhythmus beim Wert 1,0 (links). Für diese Periodenlänge wurde auch der gemittelte Verlauf errechnet und gezeichnet (rechts). Die Prozentwerte der Reliabilität liegen mit 91 % für die Aktivität und mit 87 % für die Rektaltemperatur sehr hoch, was durch die geringe Streuung bei einer relativ großen Amplitude von $0,462^{\circ}\text{C}$ zu erklären ist. Ein Zeichen für die große Stabilität des Rhythmus der Rektaltemperatur ist auch das Auftreten einer umschriebenen Temperaturerhöhung im gemittelten Zyklus während der Dunkelzeit des Zeitgebers (schraffierte Fläche). Dies kommt durch den Anstieg der Rektaltemperatur im Rahmen des Aufstehens für den Nachtgong zustande. Dieser nächtlichen Aktivität wurde bei der Schlaf-Wach-Rhythmik jedoch trotzdem der Wert Null (= Schlaf) zugeordnet, da es sich beim Nachtgong um einen von außen induzierten Wachzustand handelt, der Schlaf wird anschließend gemäß dem natürlichen Bedürfnis wieder fortgesetzt. Im gemittelten Zyklus ist daher während der Dunkelzeit keine Änderung des Schlafzustandes zu erkennen.

Die Pfeile geben die Lage der Acrophase der beiden Rhythmen in bezug auf den Zeitgeber an. Es ist offensichtlich, daß die Acrophase der Rektaltemperatur in der ersten Hälfte der Aktivität und auch der Hellzeit des Zeitgebers liegt. Auf die Phasenbeziehung zwischen Aktivität und Rektaltemperatur wird noch gesondert eingegangen werden.

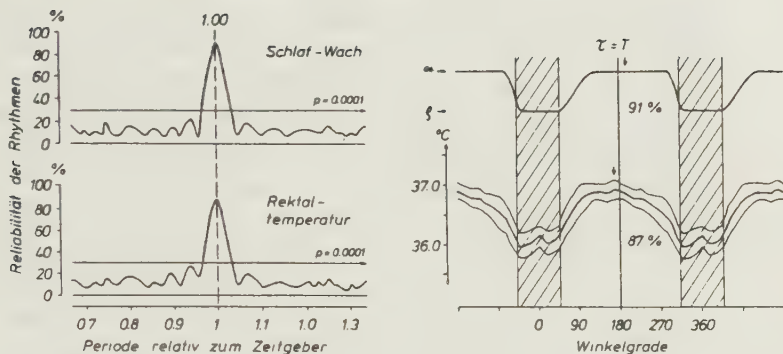


Abb. 3: Analysenergebnisse zum Versuch 272 (Verlängerung des Zeitgebers).

Links: Periodenanalyse der Zeitreihen von Aktivität und Rektaltemperatur, die Linie bei 30 % stellt das Signifikanzniveau der Reliabilität der Rhythmen für die angegebene Irrtumswahrscheinlichkeit p dar.

Rechts: Darstellung der mit der vorherrschenden Periode gemittelten Zyklen von Aktivität und Rektaltemperatur (α : Wachen, β : Schlafen,

τ : vorherrschende Periodenlänge der Rhythmen, T : Periodenlänge des Zeitgebers, = 1,0 in der Periodenanalyse). Die schraffierten Flächen stellen die Dunkelzeit des Zeitgeberzyklus (= 360°) dar. Außerdem angegeben sind durch kleine Pfeile die Lage der Acrophase und durch Zahlen die in der Periodenanalyse ermittelten Prozentwerte der Reliabilität der Rhythmen. Für die Variable Rektaltemperatur ist durch etwas dünnere Linien der Bereich der berechneten Standardabweichungen um den gemittelten Zyklus dargestellt.

Im Versuch 272 war jeder Zeitgeberzyklus 10 Minuten länger als der vorhergehende. Innerhalb von vier Wochen kommt man auf diese Weise nicht über ein T von ca. 29 h hinaus. Damit ein T von über 30 h zu erreichen war, betrug im Versuch 298 die Verlängerungsrate 15 Minuten pro Zyklus. Die Abbildung 2 d zeigt den Versuchsablauf, die Abbildungen 4 und 5 die Analysen der Zeitreihen von Aktivität und Rektaltemperatur. Anhand der Dreiecke in der Abbildung 2 d läßt sich auch in diesem Versuch der zum Zeitgeber und damit zur Aktivität synchrone Verlauf der Rektaltemperatur erkennen. Zu beachten ist wiederum die Phasenverschiebung des Rektaltemperatur- relativ zum Aktivitätsrhythmus in den ersten Zyklen von später zu früher Phasenlage.

Im Spektrum der Abbildung 4 bildet sich die vorherrschende Periode des Rektaltemperaturrhythmus beim Wert 1,0 (= Zeitgeberperiode) mit einer Reliabilität von 75 % als Ausdruck der Synchronisation ab (der Peak liegt minimal unter dem Wert 1,0, was durch die oben erwähnte Phasenverschiebung zu Beginn des Versuchs bedingt ist). Im Periodenspektrum ergibt sich auch noch ein zweiter Peak beim Wert 0,94 T, der die Signifikanzschwelle von 30 % jedoch nur knapp überschreitet. Eine Erklärung für diesen Peak liefert der zeitliche Verlauf der gerechneten Acrophase des Temperaturrhythmus (Abb. 5). Auch hier ist die Verschiebung von einer späten zu einer früheren Phasenlage in den ersten Zyklen zu erkennen. Bis zum 15. Zyklus bleibt die Acrophase dann relativ stabil, danach wird ein regelmäßig fluktuierender Verlauf erkennbar, der auch im Amplitudenverhalten widergespiegelt wird. Dies ist ein Anzeichen von relativer Synchronisation [36], bei der Synchronisation nur im zeitlichen Mittel gegeben ist, während die aktuelle Phase (und Amplitude) regelhaft um einen Mittelwert pendelt. Dieses Schwanken ist verantwortlich für den kleinen Peak bei 0,94 T.

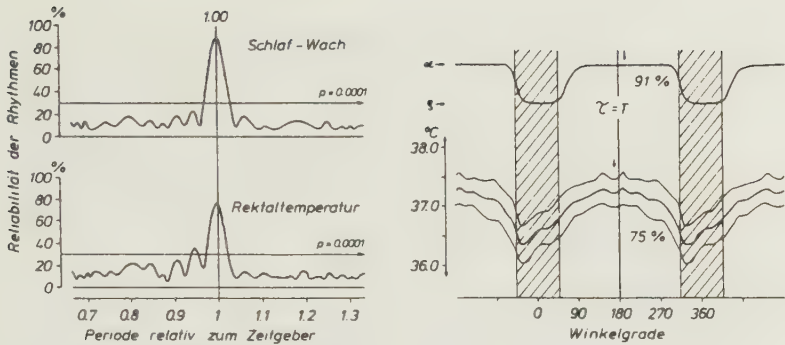


Abb. 4: Analysenergebnisse zum Versuch 298 (Verlängerung des Zeitgebers, Erläuterungen siehe Legende zu Abb. 3)

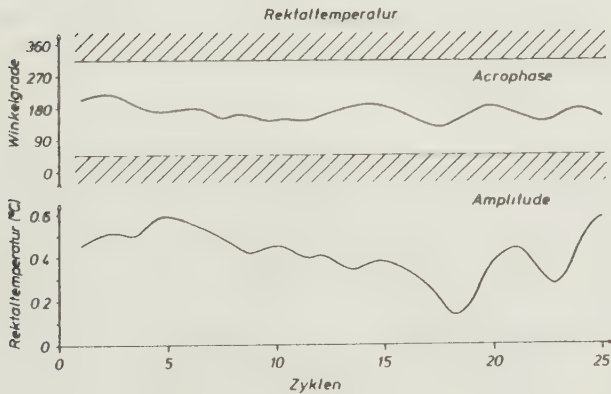


Abb. 5: Harmonische Analyse der Variablen Rektaltemperatur im Versuch 298. Als Zeitraster liegt der Analyse die Zeitgeberperiodenlänge zugrunde (schraffierte Fläche: Dunkelzeit des Zeitgebers). Dargestellt sind der zeitliche Verlauf der berechneten Acrophase (in Winkelgraden, 360° entsprechen einem Zeitgeberzyklus) und die entsprechende Größe der Amplitude des Rektaltemperaturrhythmus.

Beim gemittelten Zyklus (Abb. 4, rechts) erkennt man eine etwas größere Streuung als im Versuch 272, jedoch auch einen durch den Nachtgong bedingten Anstieg der Rektaltemperatur in der Dunkelzeit des Zeitgebers und zusätzlich eine Senke in den Mittagsstunden, wie sie für die Rektaltemperatur vielfach beschrieben wurde. Die Amplitude betrug $0,381^{\circ}\text{C}$.

Die Abbildung 6 zeigt die Ergebnisse der Analysen für den Versuch 270 (Balkendarstellung: Abb. 2 b). Die Verlängerungsrate betrug 10 Minuten pro Zyklus. Auch in diesem Versuch verläuft die Rektaltemperatur synchron zum Zeitgeber und mit der Aktivität. Ein Peak im Spektrum beim Wert 1,0 mit hoher Reliabilität von 75 %, eine geringe Standardabweichung bei einer Amplitude von $0,348^{\circ}\text{C}$ und der durch den Maskiereffekt des nächtlichen Aufstehens bedingte Anstieg der Rektaltemperatur im gemittelten Zyklus bestätigen dies. Der kleinere Peak ist wie in Versuch 198 auf Schwankungen der Acrophase zurückzuführen.

Einen qualitativ ganz anderen Verlauf nimmt der Rektaltemperaturrhythmus im Versuch 269, wie man schon in der Balkendarstellung erkennen kann (Abb. 2 a). Während - nach anfänglicher Phasenverschiebung - Maxima und Minima der Rektaltemperatur bis etwa zur Mitte des Versuches dem Zeitgeber folgen, ist dies im zweiten Teil nicht mehr der Fall. Der Rhythmus der Rektaltemperatur verläuft unabhängig vom Zeitgeber und - da die Aktivitätsperiodik synchron zum Zeitgeber verläuft - auch unabhängig von dieser mit einer freilaufenden Periode. Es besteht in diesem zweiten Teil des Versuches interne Desynchronisation. Diese Unabhängigkeit von Aktivitäts- und Temperaturrhythmik kommt auch beim zeitlichen Verlauf der Acrophasen beider Variablen zum Ausdruck (Abb. 7). Während die Acrophase des Schlaf-

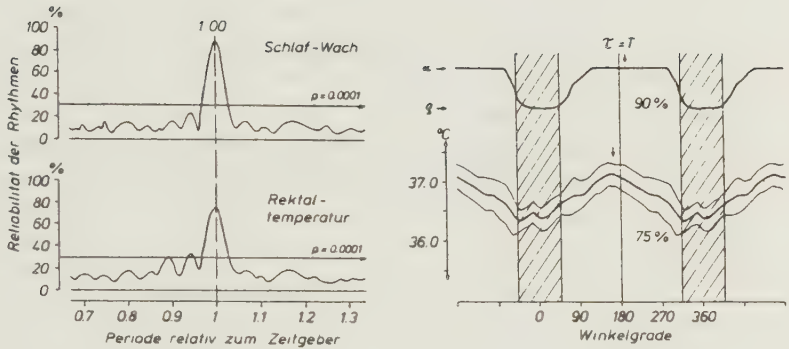


Abb. 6: Analysenergebnisse zum Versuch 270 (Verlängerung des Zeitgebers, Erläuterungen siehe Legende zu Abb. 3)

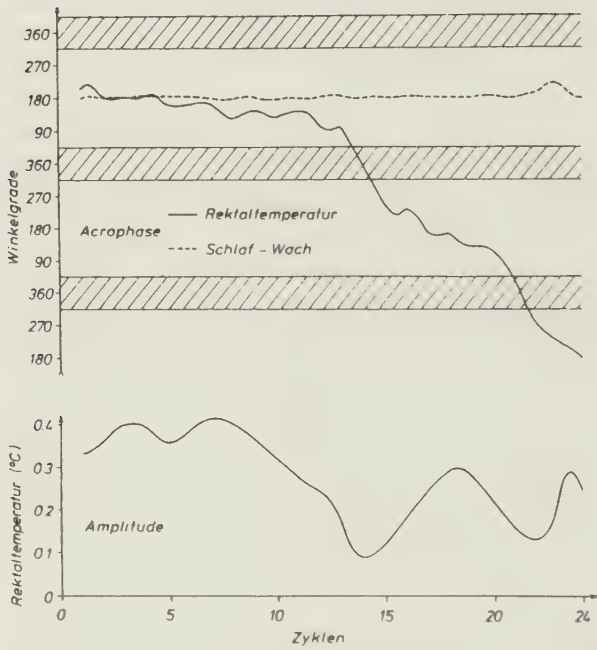


Abb. 7: Harmonische Analyse der Variablen Rektaltemperatur und Aktivität im Versuch 269 (Erläuterungen siehe Text und Legende zu Abb. 5, das Amplitudenverhalten ist nur für die Rektaltemperatur dargestellt)

Wach-Rhythmus eine äußerst stabile Phasenlage hat (eine Ausnahme ist das späte Aufstehen der Versuchsperson im 23. Zyklus, vgl. Abb. 7 und Abb. 2 a), verschiebt sich die Acrophase der Variablen Rektaltemperatur ab dem 14. Zyklus stetig nach vorne. Zwischen dem 16. und 20. Zyklus ist diese Verschiebung wieder verlangsamt (Wiederansteigen der Amplitude), ehe sich die Acrophase ein zweites Mal stetig (wieder schneller) durch die Dunkelzeit des Zeitgebers bewegt (erneutes Abfallen der Amplitude). Dieser Wechsel zwischen rascher und verlangsamer Acrophasenverschiebung gehört zum Bild der relativen Koordination [17, 36] im Rahmen der Desynchronisation im zweiten Versuchsteil.

Für die Periodenanalyse wurde die Zeitreihe entsprechend dem Abrißzeitpunkt der Rektaltemperaturperiodik in zwei Abschnitte geteilt. Das Ergebnis zeigt die Abbildung 8, im oberen Teil der Versuchsabschnitt mit Synchronisation von Rektaltemperatur und Aktivität, im unteren Teil der Abschnitt mit interner Desynchronisation. Der Peak für die vorherrschende Periode der Rektaltemperaturrhythmik im Teil I hat eine Reliabilität von 68 %, liegt aber nicht exakt beim Wert 1,0 (= Zeitgeberperiode), sondern etwas darunter. Dies ist durch die Phasenverschiebung zu Beginn des Versuchs bedingt.

Im Teil II des Versuchs ergibt sich eine Periode von 0,875 T mit einer Reliabilität von 49 % für den Rhythmus der Rektaltemperatur. Beim Wert 1,0 ist kein reliabler Rhythmus vorhanden (29 %), wohl aber ein reliabler Schlaf-Wach-Rhythmus mit 77 %.

Die mittlere Zeitgeberperiode für den 2. Versuchsabschnitt beträgt 28,33 h. Ein Wert von 0,875 T entspricht demnach einer Periodenlänge von 24,8 h in absoluten Zahlen. Da diese Freilauf-rhythmik unabhängig vom Zeit-

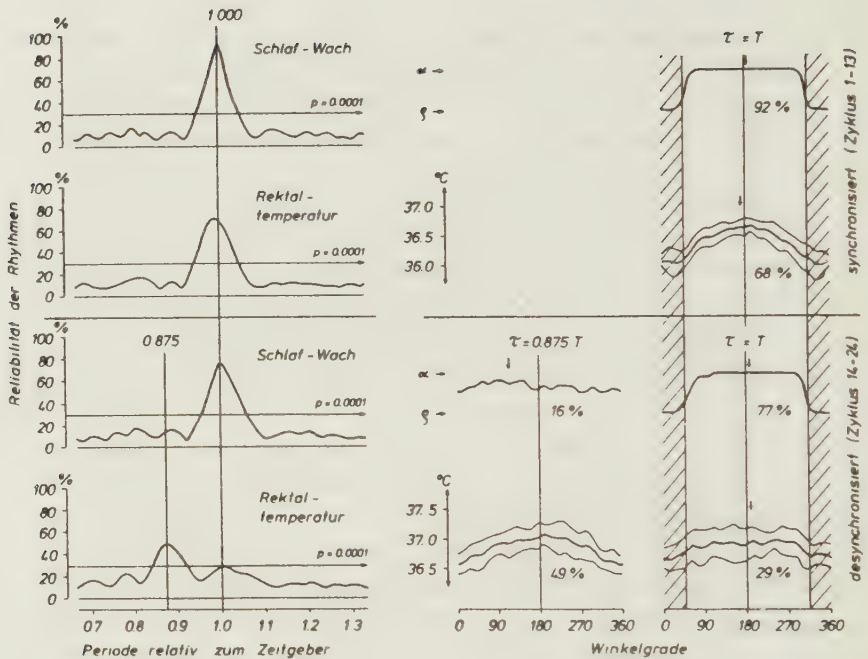


Abb. 8: Analysenergebnisse zum Versuch 269 (Verlängerung des Zeitgebers). Die Analyse der Zeitreihen von Aktivität und Rektaltemperatur wurde in zwei Abschnitten durchgeführt, oben die Ergebnisse für den Versuchsteil mit Synchronisation, unten für den Versuchsteil mit Desynchronisation von Rektaltemperatur und Aktivität. Die gemittelten Zyklen sind im Abschnitt mit Desynchronisation für die zwei im Periodogramm (links unten) vorherrschenden Periodenlängen dargestellt (rechts unten). Für die Periode $\gamma = 0,875 T$ ist die Phase der Aktivität auf die Phase des mittleren Körper-temperaturzyklus (= 180°) bezogen (weitere Erläuterungen siehe Legende zur Abb. 3).

geber und mit konstanter Periode läuft, kann man die Analyse für den zweiten Teil auch an der unveränderten Zeitreihe durchführen. Das Ergebnis ist ein Peak bei 24,8 h für die Freilaufperiode des Rektaltemperaturrhythmus mit einer Reliabilität von 53 % (Abb. 9). Dieser Wert ist geringfügig höher als der bei der relativierten Zeitreihe mit 49 % ermittelte. Der Grund liegt darin, daß eine freilaufende Rhythmik konstanter Periode in der absoluten Zeitreihe schärfer abgebildet ist als in der relativierten (siehe auch Abschnitt Methodik). Die Amplitude des Temperaturrhythmus betrug im ersten Teil 0,326°C, im zweiten Teil 0,228°C, die Reliabilität 68 % bzw. 53 %.

Verkürzung des Zeitgebers:

Es wurden zwei Versuche mit stetiger Verkürzung der Zeitgeberperiode durchgeführt, V 289 und 283, die Verkürzungsrate betrug 10 Min. pro Zyklus (siehe Tab. 1). Beim Versuch 289 bleibt der Rhythmus der Rektaltemperatur wie auch der Aktivität bis zum Ende des Versuchs (T = 18:20 h) vom Zeitgeber synchronisiert (Abb. 2 f).

Die auch bei Synchronisation im natürlichen 24 h-Tag beobachtete späte Phase des Temperaturrhythmus in Relation zum Zeitgeberzyklus wird bei der hier durchgeführten Verkürzung des Zeitgebers sogar noch weiter nach hinten verschoben. Dies läßt sich in Abbildung 2 f besonders gut an den Minima der Rektaltemperatur während der ersten Zyklen erkennen.

Die spektrale Darstellung der Periodenanalyse zeigt einen Peak beim Wert 1,0 (= Zeitgeber T) für die vorherrschende Periode der Rhythmen von Temperatur und Aktivität als Bestätigung für den Zustand der Synchronisation durch den Zeitgeber (Abb. 10). Die Reliabili-

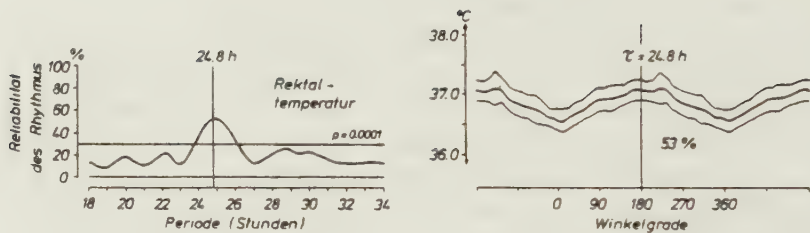


Abb. 9: Darstellung der Analysenergebnisse für die Rektaltemperatur im zweiten Abschnitt des Versuches 269. Da der Rhythmus der Rektaltemperatur hier eine konstante Periodenlänge hat (Freilauf), ist die Berechnung an der absoluten Zeitreihe durchgeführt: Der mittlere Zyklus ist für zweimal 360° dargestellt (siehe auch Legende zu Abb.3).

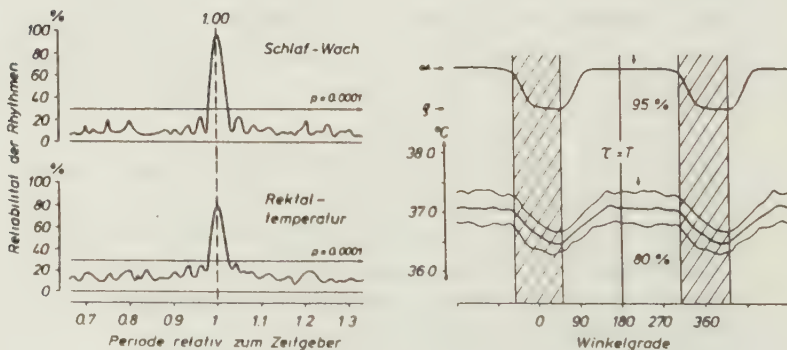


Abb. 10: Analysenergebnisse zum Versuch 289 (Verkürzung des Zeitgebers). Der gemittelte Zyklus für die Rektaltemperatur läßt die im Vergleich zu den Verlängerungsversuchen späte Phasenlage erkennen (rechts unten, sonstige Bezeichnungen wie in Abb.3).

tät für die Rektaltemperatur hat mit 80 % einen sehr hohen Wert, bei einer Amplitude von 0,297°C.

Die mittlere Zeitgeberperiode beträgt in diesem Versuch 21,25 h, ein Freilaufpeak in der spektralen Darstellung wäre somit im Bereich von ungefähr 1,1 T bis 1,2 T zu erwarten. In diesem Bereich bleibt die Reliabilität jedoch weit unterhalb des Signifikanzniveaus (Abb. 10).

Der andere Versuch mit stetiger Verkürzung der Zeitgeberperiode T ähnelt in seinem Ergebnis dem Versuch 269 (Verlängerung). Auch hier tritt in der zweiten Hälfte Desynchronisation zwischen Zeitgeber und Aktivitätsrhythmus einerseits und dem Temperaturrhythmus andererseits auf, wie sich in der Abbildung 2 e am Verlauf der Maxima und Minima erkennen läßt. Auch für diesen Versuch wurden für jeden Zyklus die Acrophasen von Rektaltemperatur und Aktivität berechnet und dargestellt (Abb. 11). Im Gegensatz zum Versuch 269 (Abb. 7) ist in diesem Versuch auch der Rhythmus der Aktivität nicht phasenstabil, sondern zeigt einen ähnlich schwankenden Verlauf wie die Rektaltemperatur im Versuch 298 (Abb. 5), auch die Balkendarstellung (Abb. 2 e) zeigt dies entsprechend.

Die Acrophase der Rektaltemperaturrhythmik bewegt sich ab Zyklus 15 in Richtung der Dunkelphase des Zeitgebers und wandert im weiteren Versuchsablauf zweimal durch diese. Ab Zyklus 17 ist der Rhythmus der Rektaltemperatur unabhängig vom Zeitgeber im Sinne eines Freilaufes. Dementsprechend wurde die Datenreihe für die Periodenanalyse und für die Berechnung der gemittelten Verläufe wie bei Versuch 269 in zwei Abschnitte unterteilt:

- synchroner Verlauf (Zyklus 1 - 16)
- desynchroner Verlauf (Zyklus 17 - 29)

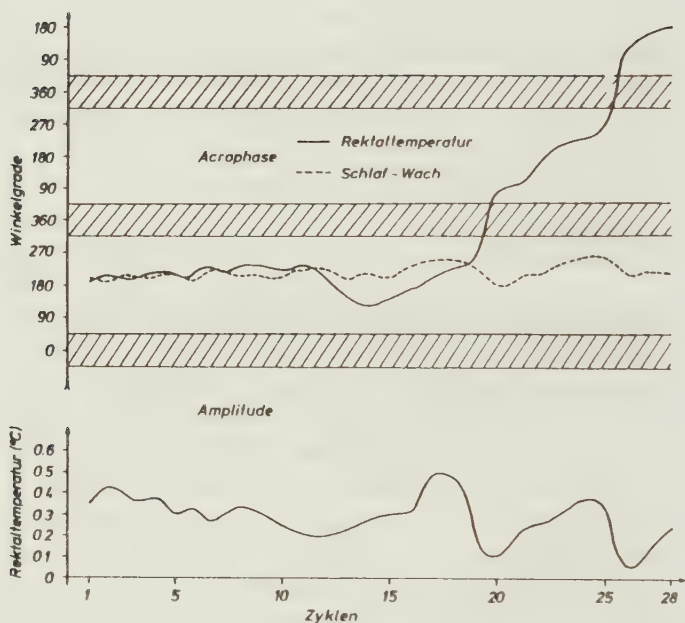


Abb. 11: Harmonische Analyse der Variablen Rektaltemperatur und Aktivität im Versuch 283 (Erläuterungen siehe Text und Legenden zu Abb. 5 und Abb. 7).

Für den ersten Teil ergibt sich das für die Synchronisation typische Bild (Abb. 12), nämlich im Spektrum nur ein Peak bei der Periode 1,0 relativ zum Zeitgeber ($= T$) mit einer Reliabilität von über 30 %, in diesem Fall 53 %. Für die Variable Schlaf-Wach beträgt die Reliabilität 82 %. In beiden Spektren findet sich kein weiterer Peak, der die Signifikanzschwelle von 30 % überschreitet.

Dies ist im zweiten Teil anders. Für die Reliabilität des Rektaltemperaturrhythmus finden sich zwei Peaks, einer bei der Periode 1,0 ($= T$) mit dem Wert 35 %, ein zweiter bei der Periode 1,23 T mit einer höheren Reliabilität von 43 %. Für den Aktivitätsrhythmus ergibt sich das gleiche Bild wie im ersten Teil, ein zweiter Peak bei der Periode 1,23 T ist zwar angedeutet, aber knapp unterhalb des Signifikanzniveaus.

Es ist eben schon erwähnt worden, daß der Rhythmus der Rektaltemperatur im zweiten Versuchsteil sich freilau fend verhält (Abb. 11). Die mittlere Zeitgeberperiode im zweiten Versuchsabschnitt beträgt 20,0 h, eine Periodenlänge 1,23 T in der Analyse der relativierten Zeitreihe entspricht demnach einer Periodenlänge von 24,6 h in absoluten Zahlen, ein für einen Freilauf sinnvoller Wert.

Es bleibt natürlich die Frage, wie der andere Peak beim Wert 1,0 zu interpretieren ist. Betrachtet man die gemittelte Darstellung des Verlaufes der Rektaltemperatur für die Periode $\tau = T$ und vergleicht sie mit dem dazugehörigen Aktivitätsverlauf, so sieht man eine fast gleiche Phasenlagen (kleine Pfeile, Abb. 12) bei sehr ähnlicher Form des mittleren Zyklus (die große Variabilität des Aufstehzeitpunktes in diesem Versuch läßt sich ebenfalls deutlich erkennen, vergleicht man die Abbildung 12 mit entsprechenden Darstellungen anderer Versuche).

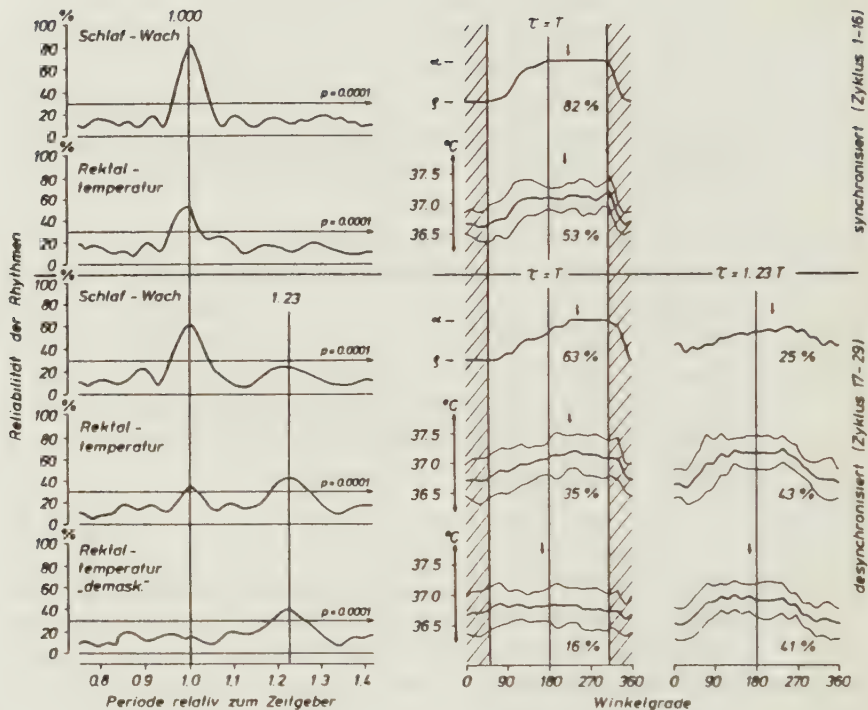


Abb. 12: Analysenergebnisse des Versuches 283 (Verkürzung des Zeitgebers). Die Berechnung wurde wie beim Versuch 269 (Abb. 8) in zwei Abschnitten - Synchronisation und Desynchronisation - durchgeführt. Im zweiten Teil wurde die Zeitreihe der Rektaltemperatur nach der im Text beschriebenen Trennung des Maskiereffektes nochmals der Periodenanalyse unterzogen (ganz unten). Die Phasenangaben für die Periode $\tau = 1,23 T$ beziehen sich auf die Acrophase des gemittelten Zyklus der Rektaltemperatur ($= 180^\circ$).

Unter der Annahme, daß diese Komponente des Temperaturrhythmus auch durch den Einfluß des Aktivitätszustandes (Wachen und Schlafen) auf ihren Verlauf entstanden ist - was nach dem eben Gesagten plausibel ist (gleiche Phase, ähnlicher gemittelter Verlauf) - bietet es sich an, diesen Maskiereffekt aus den Daten zu eliminieren und die Periodenanalyse danach nochmals durchzuführen. Es soll im folgenden kurz beschrieben werden, wie dies methodisch realisiert werden kann.

Verlaufen die Rhythmen von Rektaltemperatur und Aktivität unabhängig voneinander mit Periodenlängen, die zumindest einige Stunden auseinander liegen (im zweiten Abschnitt des Versuchs 283 sind es über vier Stunden), so liegt das Maximum der Rektaltemperatur nicht immer in der Wachzeit, sondern auch in der Schlafzeit der Versuchsperson. Das gleiche gilt invers für das Minimum. Beide verschieben sich ständig durch den Rhythmus von Schlafen und Wachen, es besteht keine feste Phasenbeziehung. Berechnet man für einen solchen Abschnitt interner Desynchronisation das Mittel für die Werte der Rektaltemperatur, die im Wachzustand gemessen wurden und entsprechend den Mittelwert für die Schlafwerte, so ist der Differenzbetrag der beiden Mittelwerte in Annäherung ein Maß für den Maskiereffekt. Noch genauer wird diese Methode, wenn man der Mittelwertsberechnung den für die Zeitgeberperiode gemittelten Verlauf der Rektaltemperatur jeweils für Schlafwerte und Wachwerte zugrunde legt. Den für den Maskiereffekt gefundenen Wert kann man nun entweder von den Wachwerten abziehen oder den Schlafwerten zuaddieren. Man erhält jeweils eine vom Einfluß des Maskiereffektes mehr oder weniger bereinigte Datenreihe. In dieser Arbeit wurde der Maskiereffekt von den Wachwerten abgezogen. Diese Datenreihe kann jetzt nochmals der Periodenanalyse un-

terzogen werden. Für weitere Details siehe [40].

Das Ergebnis für den Versuch 283 zeigt die Abb. 12 (ganz unten). Die Reliabilität bei der Periode 1,0 ($= T$) ist drastisch von 35 % auf 16 % reduziert, eine regelrechte Amplitude nicht mehr erkennbar. Die Reliabilität des freilaufenden Rektaltemperaturrhythmus bleibt dagegen unverändert (43 % vor der "Demaskierung", 41 % danach).

Man kann also davon ausgehen, daß ab Zyklus 17 der Rhythmus der Rektaltemperatur mit einer konstanten Freilaufperiode von 24,6 h verläuft. Daher wurde die Periodenanalyse zusätzlich noch an der absoluten Datenreihe durchgeführt. Das Ergebnis zeigt die Abb. 13. Für die Aktivität liegt der Peak bei 20,0 h, was der mittleren Zeitgeberperiodenlänge des zweiten Teils entspricht. Für die Rektaltemperatur ergibt sich im Periodenspektrum ein Peak von 24,6 h, das ist der Wert, der auch in der relativierten Zeitreihe gefunden wurde, ein weiteres Indiz dafür, daß die Relativierung die wichtigen Parameter nicht verändert. Beim Wert 20,0 h wird die Reduzierung der Reliabilität durch die Demaskierung ebenfalls sehr deutlich, nochmals eine Bestätigung dafür, daß diese Komponente des Rhythmus der Rektaltemperatur in diesem Versuch nicht endogenen Ursprungs ist, sondern durch Maskierung bedingt ist.

Veränderung der Beleuchtungsbedingungen

Drei Versuche (V 285, 288, 294) wurden durchgeführt, in denen die Beleuchtungsbedingungen verändert wurden, um den Einfluß von hellem Licht im direkten Vergleich mit Normallicht zu verifizieren.

Im Versuch 285 (Abb. 2 g) wurde ein Hell-Dunkel-Zeitgeber benutzt, der eine konstante Periode von $T = 28:00$ h hatte.

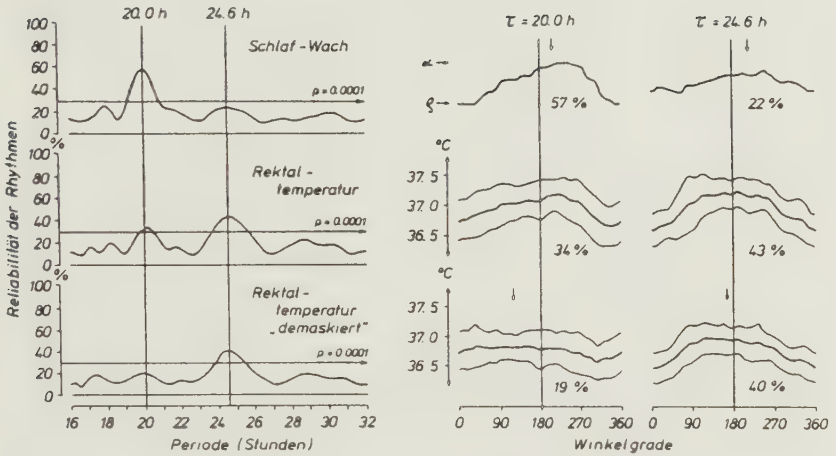


Abb. 13: Analysenergebnisse der Variablen Aktivität, Rektaltemperatur und Rektaltemperatur "demaskiert" für den zweiten Versuchsteil von Versuch 283, berechnet über die absoluten Zeitreihen der Variablen. Die Phasenangaben sind auf den gemittelten Rektaltemperaturzyklus bezogen. Die mittlere Periodenlänge des Zeitgebers beträgt in diesem Teil 20,0 h.

Im ersten Teil wurde normales, im zweiten Teil helles Licht verwendet. Die Fragestellung bestand darin, ob es möglich wäre, den Rhythmus der Rektaltemperatur, der nach bisherigen Erkenntnissen unter einem Zeitgeber mit normalem Licht bei einem T = 28:00 h freilaufen sollte, durch die Umstellung auf helles Licht auf diese Periodenlänge zu synchronisieren.

Ersteres wurde durch den Versuch bestätigt, nicht jedoch die zweite Annahme. In Abbildung 2 g erkennt man an den Minima und Maxima, daß der Rektaltemperaturrhythmus nicht synchron zum Zeitgeber verläuft. Nach dem Übergang auf helles Licht hat man zwar den Eindruck, daß Maxima und Minima dem Zeitgeber für kurze Zeit folgen. Danach ist jedoch wieder ein freilaufender Rhythmus erkennbar. In Abbildung 14 finden sich die Analysenergebnisse, oben über alle Daten gerechnet, in der Mitte und unten jeweils über die Daten der Abschnitte mit normalem bzw. hellem Licht. In allen Abschnitten ist der Aktivitätsrhythmus vom Zeitgeber synchronisiert. Für den Rektaltemperaturrhythmus ergeben sich in allen Periodogrammen zwei Peaks oberhalb des Signifikanzniveaus, der eine bei 24,5 h, der andere bei 28,0 h Periodenlänge. In allen Abschnitten ist die 24,5 h-Periodik stärker vertreten als die 28,0 h-Periodik, die der des Zeitgebers entspricht. Das helle Licht war offenbar nicht in der Lage, die Rektaltemperatur zu synchronisieren, auch die Relation zwischen beiden Komponenten ist im Vergleich zum Normallicht nicht verändert, wie an den Prozentwerten der Reliabilität erkennbar wird. Es stellt sich wie im Versuch 283 die Frage, wodurch die 28,0 h-Komponente in der Rektaltemperaturrhythmik zustande kommt. Die Analyse der Daten wurde daher wiederholt, nachdem die oben beschriebene Methode zur Beseitigung des Maskiereffekts angewandt worden war. Das Ergebnis zeigt die Abb. 15.

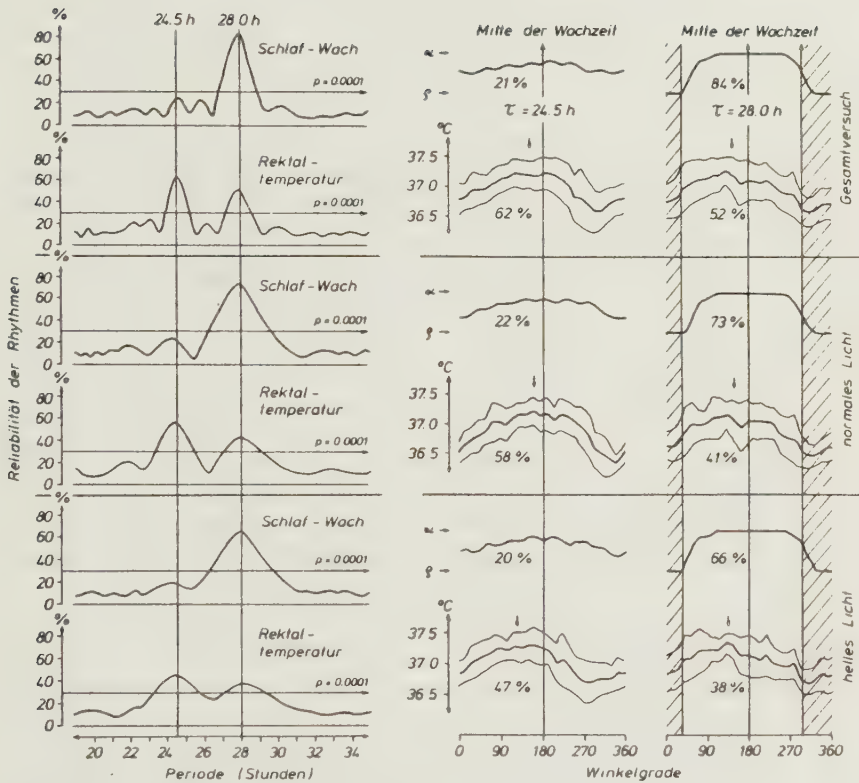


Abb. 14: Analysenergebnisse des Versuches 285 (Wechsel der Beleuchtungsbedingungen bei konstanter Zeitgeberperiode $T = 28:00 \text{ h}$). Die Berechnungen wurden an den absoluten Zeitreihen des Gesamtversuches (oben) und jeweils des Abschnitts mit normalem (Mitte) und mit hellem Licht (unten) durchgeführt (siehe auch Legende zu Abb. 3).

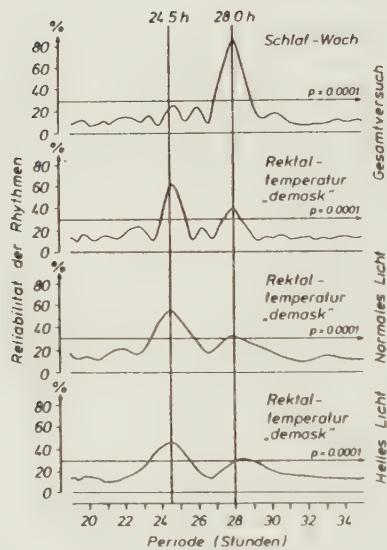


Abb. 15: Periodogramme der Variablen Rektaltemperatur "demaskiert" im Versuch 285. Gesamtversuch (oben, zum Vergleich auch das Periodogramm für die Aktivität), Abschnitt mit normalem (Mitte) und mit hellem Licht (unten).

Die Reliabilität der 28,0 h-Komponente des Rektaltemperaturrhythmus ist im Vergleich zur Abb. 14 zwar deutlich reduziert, aber in beiden Abschnitten noch knapp oberhalb des Signifikanzniveau. Eine so drastische Reduzierung wie im Versuch 283 war durch die Demaskierung in diesem Versuch nicht möglich. Diese Komponente ist also nur zum Teil durch den Maskiereffekt bedingt und sowohl im hellen als auch im normalen Licht auch endogenen Ursprungs, was darauf hindeutet, daß eine relevante Interaktion zwischen den endogenen Oszillatoren für die Rhythmen von Aktivität und Rektaltemperatur bestanden hat [36]. Verdeutlicht wird jedoch das Vorherrschen der Freilaufkomponente bei 24,5 h. Dieser Wert ist für beide Versuchsabschnitte gleich.

Ein Unterschied zwischen den beiden Versuchsteilen ergibt sich aber: Die Reliabilität und die Amplitude des freilaufenden Temperaturrhythmus haben unter normalem Licht als Zeitgeber höhere Werte als unter hellem Licht (Tab. 5).

Die Versuche 288 und 294 (siehe Tab. 1 sowie Abb. 2 h und 2 i) sollten zeigen, ob normales Licht als Zeitgeber in der Lage wäre, die durch helles Licht auf eine Periode von 28,0 h synchronisierte Rhythmik auf dieser Periodenlänge synchronisiert zu halten.

Im Versuchsabschnitt mit hellem Licht wurde die Voraussetzung - auf 28,0 h synchronisierte Rhythmik - durch einen sich stetig von 26,0 bis 28,0 h verlängern- den Zeitgeber erreicht. Dies zeigt die Lage von Maxima und Minima in den Balkendarstellungen und die statistischen Analysen (Abb. 16 und Abb. 17, jeweils oberer Teil). Es ergibt sich nur ein Peak beim Wert 1,0 (= T) mit einer Reliabilität von 75 % (Versuch 288) bzw. von 58 % (Versuch 294).

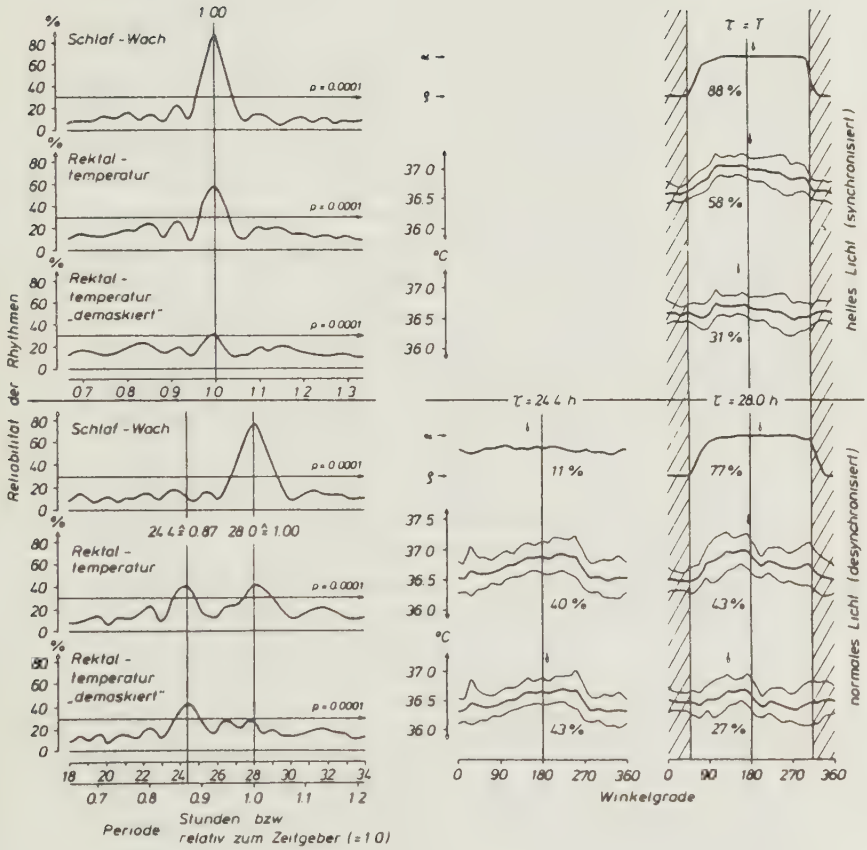


Abb. 17: Analysenergebnisse des Versuches 294
(siehe Legende zu Abb. 16)

Nach dem Wechsel auf normales Licht als Zeitgeber eines 28,0 h-Tages scheint der Rhythmus der Rektaltemperatur synchronisiert zu bleiben, wenn man die Lage der Maxima und Minima in den Balkendarstellungen vergleicht. Lediglich in den letzten Zyklen weichen sie vom vorgegebenen Tag ab (Abb. 2 h und 2 i). Im Periodogramm (Abb. 16 und 17, unterer Teil) zeigt sich ebenfalls eine vorherrschende Periode beim Wert 28,0 mit einer Reliabilität von 50 % (V 288) bzw. von 43 % (V 294). Die Rechnung ergibt jedoch bei beiden Versuchen im Periodenspektrum auch einen zweiten, wenn auch - besonders im Versuch 288 - weniger reliablen Peak bei kürzeren Periodenlängen, 24,6 im Versuch 288 bzw. 24,4 h im Versuch 294. Diese Werte sind typisch für freilaufende Rhythmen. Die Frage ist nun, ob diese Peaks nur das Freilaufen der Rektaltemperatur in den letzten Zyklen repräsentieren (siehe Balkendarstellung), oder ob in den Daten eine Freilaufkomponente schon von Beginn des Normallicht-Zeitgebers an vorhanden ist. Um dies zu beantworten, wurde für den Versuchsteil mit Normallicht einerseits die schon beschriebene "Demaskierung" durchgeführt und danach die statistische Analyse wiederholt, andererseits die Datenreihe dieses Versuchsteils für die Analyse nochmals in zwei Hälften unterteilt. Nach der "Demaskierung" ist der Peak bei 28,0 h, der der Zeitgeberperiode entspricht, drastisch reduziert, von 50 % auf 30 % im Versuch 288 bzw. von 43 % auf 27 % im Versuch 294, während gleichzeitig der Freilaufpeak an Reliabilität zugenommen hat, von 34 % auf 41 % im Versuch 288 bzw. von 40 % auf 43 % im Versuch 294 (Abb. 16 und 17, ganz unten).

Wie die Analyse der beiden Hälften des zweiten Versuchsabschnitts ergab, besteht dieser Freilauf schon vom Zeitpunkt des Wechsels auf normales Licht als Zeit-

geber an, also nicht nur in den letzten Zyklen.

Zusammenfassend kann gesagt werden, daß in beiden Versuchen der Rhythmus der Rektaltemperatur unter normalem Licht als Zeitgeber eines 28,0 h-Tages freilief, jedoch einem erheblichen Maskiereffekt unterworfen war, der auf den ersten Blick eine Synchronisation der Rhythmen möglich erscheinen ließ. Der Maskiereffekt betrug im Versuch 288 $0,43^{\circ}\text{C}$, im Versuch 294 $0,32^{\circ}\text{C}$. Dieser - im zweiten Versuchsteil ermittelte Wert - wurde, um den Anteil des Maskiereffekts an der Rhythmik der Rektaltemperatur im ersten Versuchsteil abzuschätzen, von dessen Wachwerten der Rektaltemperatur abgezogen. Die Analyse zeigt, daß der Maskiereffekt besonders im Versuch 294 einen großen Anteil an der Gesamtrhythmik hat (Abb. 16 und 17, oberer Teil).

Im folgenden werden die Werte des Maskiereffekts für die Versuche angeführt, bei denen interne Desynchronisation bestand, was ja eine Voraussetzung für die Ermittlung des Wertes ist. Bei vier Versuchen wird zum Vergleich auch der Wert angeführt, wie er in der relativierten Zeitreihe gefunden wurde.

V 283	absolut	:	$0,39^{\circ}\text{C}$	
	relativ	:	$0,37^{\circ}\text{C}$	
V 269	absolut	:	$0,24^{\circ}\text{C}$	
	relativ	:	$0,25^{\circ}\text{C}$	
V 285	absolut	:	$0,34^{\circ}\text{C}$	(in beiden Abschnitten gleich)
V 288	absolut	:	$0,43^{\circ}\text{C}$	
	relativ	:	$0,43^{\circ}\text{C}$	
V 294	absolut	:	$0,32^{\circ}\text{C}$	
	relativ	:	$0,33^{\circ}\text{C}$	

Der Mittelwert beträgt $0,344 \pm 0,072^{\circ}\text{C}$ für die Werte, die aus den absoluten Zeitreihen ermittelt wurden ($n=5$), und $0,345 \pm 0,076^{\circ}\text{C}$ für die aus den relativierten Zeitreihen ($n=4$).

4. Phasenbeziehung zwischen Aktivität und Rektaltemperatur

Verlaufen die Rhythmen von Aktivität und Rektaltemperatur mit gleicher Periode, so lassen sich Phasenbeziehungen beider Variablen ermitteln. In Versuchen mit künstlichen Zeitgebern verschiedener Periodenlängen sind ganz bestimmte Phasenbeziehungen zu erwarten, wenn die Rhythmen durch den Zeitgeber synchronisiert sind [36]. Auch in dieser Arbeit sollen die ermittelten Phasenbeziehungen dazu dienen, auf andere Weise gefundene Ergebnisse in ihrer Plausibilität zu bestätigen.

Wie eben erwähnt, ist es nur dann sinnvoll, interne Phasenbeziehungen zu berechnen, wenn die zur Diskussion stehenden Variablen mit gleicher Periode verlaufen. Aus diesem Grund sind im folgenden nur für die Versuche bzw. Versuchsabschnitte Phasenbeziehungen berechnet worden, bei denen diese Voraussetzung nach den Ergebnissen der anderen Analysen erfüllt war. Der Versuch 285 z.B. ist nicht berücksichtigt worden, da während des ganzen Versuchs interne Desynchronisation bestand.

Bei der Berechnung wurde als Bezugspunkt die Mitte der Dunkelzeit des Zeitgebers gewählt (0° bzw. 360° , Angabe in Winkelgraden), wobei 360° einem Zeitgeberzyklus beziehungsweise dem über mehrere Zyklen gemittelten Zeitgeberzyklus entsprechen. In den Darstellungen der

Analysenergebnisse kommt dieses Schema jeweils in der Darstellung des gemittelten Zyklus zum Ausdruck. Die Dunkelzeit des Zeitgebers ist schraffiert, eine Linie bei 180° (Mitte der Hellzeit) dient als optische Referenz, die Acrophase der Variablen ist durch einen kleinen Pfeil gekennzeichnet.

In der Tabelle 6 sind die Acrophasen in Winkelgraden aufgeführt. Es wurden Mittelwerte jeweils für Verkürzungs- und Verlängerungsversuche und jeweils für die beiden Variablen Aktivität und Rektaltemperatur gebildet. In den Verlängerungsexperimenten ($T > 26$ h) liegt die Phase der Rektaltemperatur (Mittelwert = $179,3^\circ$) vor der Phase der Aktivität (MW = $201,8^\circ$) etwa in der Mitte der Hellzeit. Dabei ist zu beachten, daß sich die Phase der Rektaltemperatur in den ersten Zyklen von später zu früher Phasenlage verschiebt. Ließe man in der Berechnung diese ersten nicht völlig phasenstabilen Zyklen außer acht, so würde sich eine noch frühere Phasenlage ergeben.

In den Versuchen mit Verkürzung des Zeitgebers ($T < 24$ h) finden sich zwei Unterschiede: Zum einen liegt die Phase der Rektaltemperatur (Mittelwert = 230°) später, zum anderen führt die Phase der Aktivität (MW = 224°) die Temperaturphase jetzt an, obwohl auch sie später liegt als in den Verlängerungsversuchen. Diese beschriebenen Phasenbeziehungen zeigen sich nicht nur im Mittelwert, sondern in gleicher Weise in jedem einzelnen Versuch beziehungsweise Versuchsschnitt.

Tabelle 6: Acrophasen der Variablen Aktivität und Rektaltemperatur in Winkelgraden, oben: Verlängerung des Zeitgebers (n=6), unten: Verkürzung des Zeitgebers (n=2), A: Abschnitt des entsprechenden Versuches mit interner Synchronisation

Versuch	Aktivität	Rektaltemperatur
269 A	189°	169°
270	195°	168°
272	202°	170°
288 A	222°	210°
294 A	204°	192°
298	199°	167°
	MW = 201,8°	179,3°
283 A	230°	235°
289	218°	225°
	MW = 224°	230°

5. Urinvariablen

Im Abschnitt Methodik wurde schon erwähnt, daß das Hauptgewicht der Arbeit auf den Variablen Aktivität und Rektaltemperatur liegt. Daher findet sich nicht für jedes Ergebnis der Urinvariablen K, Ca, Na und Volumen eine Abbildung. Doch wurden auch sie auf ihre Rhythmizität mittels Periodenanalyse untersucht. Dabei wurde nicht nur über die gesamte Datenreihe gerechnet, sondern auch in Abschnitten, die teilweise denen für die Analyse der gebildeten Rektaltemperatur entsprachen, teilweise neu gewählt wurden.

Die Ereignisse entsprechen in ihrer Tendenz denen für die Rektaltemperatur gefundenen, es ergaben sich im Detail auch Abweichungen. Daher werden für jeden Versuch kurz die wichtigsten Punkte besprochen.

Als Beispiel für die Verlängerungsversuche dienen in der Abb. 18 die Ergebnisse des Versuchs 272 (vgl. Abb. 2 c und Abb. 3). Bis auf die Variable Volumen haben alle Urinvariablen eine reliable Rhythmik beim Wert $1,0 = T$ und verlaufen somit - wie auch Rektaltemperatur und Aktivität - über den gesamten Versuch synchron zum Zeitgeber. Die höchste Reliabilität findet sich bei der Variablen Ca mit 70 %, gefolgt von K mit 67 %, Na mit 57 % und Volumen mit 30 %.

Im Versuch 270 haben die Variablen Na und Volumen keine reliable Rhythmik. Die Rhythmen von Ca und K verlaufen - über die gesamte Datenreihe gerechnet - synchron zum Zeitgeber; teilt man die Datenreihe in zwei gleichlange Abschnitte, dann läßt sich nur im ersten, nicht aber im zweiten Teil eine reliable Rhythmik nachweisen. Für die Variable Körpertemperatur war Synchronisation über den gesamten Versuch, also auch in der zweiten Hälfte, durch Rechnung nachgewiesen worden (vgl. Abb. 2 b und Abb. 6).

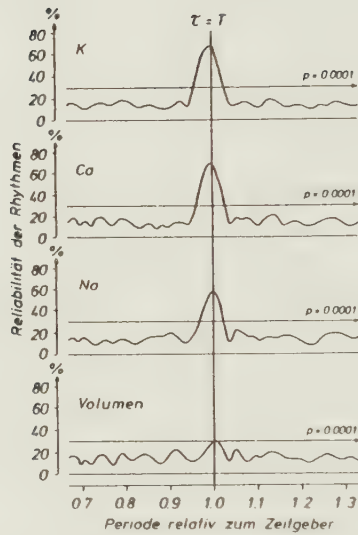


Abb. 18: Periodogramme von vier Urinvariablen des Versuches 272. Der Analyse liegen jeweils die gesamten, relativierten Zeitreihen zugrunde. Die Periode 1,0 entspricht genau der Zeitgeberperiode T.

Im Versuch 298 ergab sich für alle Urinvariablen ein reliabler vom Zeitgeber synchronisierter Rhythmus bei Berechnung über alle Daten. Die Prozentwerte der Reliabilität betrugen 68 % für Ca, 59 % für das Volumen, 57 % für K und 50 % für Na. Bei der Variablen Ca ergibt sich jedoch auch ein in der Signifikanz grenzwertiger Freilaufrrhythmus bei 24,8 h. Bei Durchführung der Analyse in Drittelabschnitten zeigte sich, daß dieser Rhythmus erst im letzten Drittel des Versuches auftritt, jedoch nur in den Variablen Ca und K, nicht in den Variablen Na und Volumen. Daneben besteht die synchronisierte Komponente mit etwa gleich hoher Reliabilität fort. Es liegt somit im letzten Drittel dieses Versuches interne Desynchronisation zwischen den Variablen Na, Volumen, Rektaltemperatur und Aktivität einerseits und Ca und K andererseits vor, zumindest was die freilaufende Rhythmuskomponente von Ca und K betrifft.

Im Versuch 269, in dem die Rektaltemperatur der Versuchspersonen ab dem 14. Zyklus freilief, wurde die Analyse für die Urinvariablen über die gleichen Abschnitte wie für die Rektaltemperatur durchgeführt. Die Variablen Na und Volumen zeigten keine reliable Rhythmik. Die Ergebnisse für K und Ca zeigt die Abbildung 19. Den linken Periodogrammen liegen die absoluten Zeitreihen, den rechten die relativierten zugrunde, oben (I) die Analyse von Zyklus 1 - 13, unten (II) von Zyklus 14 bis 24. Während in Teil I der Analyse der Peak knapp unter 1,0 (= T) bzw. 26,5 h (= $\bar{T}$, mittlere Zeitgeberperiode in Stunden) liegt, liegt er im 2. Teil bei 0,875 T, was einer Periodenlänge von 24,8 h entspricht (links). Somit zeigen diese beiden Variablen das gleiche Ergebnis wie die Rektaltemperatur, Synchronisation von Zyklus 1 - 13, Freilauf ab dem 14. Zyklus bis Ende des Versuchs. Die Reliabilitäten bewe-

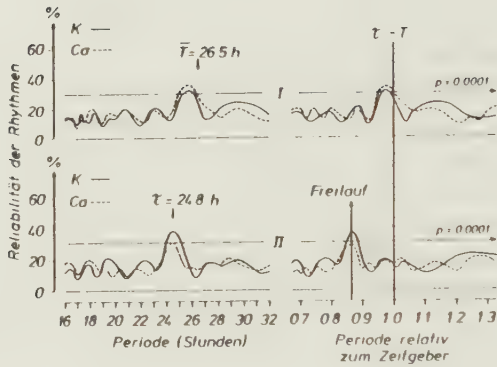


Abb. 19: Periodogramme von 2 Urinvariablen (K und Ca) des Versuches 269 für den Versuchsteil mit Synchronisation (I) und den mit Desynchronisation (II), berechnet für die absoluten (links) und relativierten Zeitreihen (rechts).

gen sich über der Signifikanzschwelle von 30 %. Für die Variable Ca ist der Prozentwert der Reliabilität in der Analyse der relativierten Zeitreihe des zweiten Teiles kleiner als 30 % (29 %). In der Analyse über die absolute Zeitreihe wird der Freilauf im zweiten Teil schärfer abgebildet (siehe Abschnitt Methodik). Der Prozentwert beträgt 31 %. Wie erwähnt, liegt der Peak in der Analyse für Teil 1 knapp unterhalb des Wertes 1,0 (= T). Ganz offensichtlich zeigen die beiden Urinvariablen K und Ca eine ähnlich langsame Phaseneinstellung während der ersten Versuchszyklen wie die Rektaltemperatur (Abb. 8 links oben), so daß sich im Mittel eine etwas kürzere als die Zeitgeberperiodenlänge ergibt.

Die Abbildung 20 zeigt die Ergebnisse für die Urinvariablen im Versuch 289 (Verkürzung des Zeitgebers, vgl. Abb. 2 f und Abb. 10). Alle zeigen deutlich reliable Rhythmen beim Wert 1,0 (= T) und verlaufen somit wie auch die Rektaltemperatur synchron zum Zeitgeber, ohne daß sich ein Freilauf zeigt. Die Prozentwerte der Reliabilität betragen 62 % für Ca, 55 % für das Volumen, 52 % für K und 44 % für Na.

Für die Analyse der Urinvariablen des Versuches 283 (vgl. Abb. 2 e und Abb. 12) wurden die Datenreihen in gleicher Weise geteilt wie für die Rektaltemperatur. Im ersten Teil (Zyklus 1 - 16) verlaufen alle Urinvariablen in ihrem Rhythmus synchron zum Zeitgeber mit vergleichsweise hohen Reliabilitäten: 52 % für K, 50 % für Ca, 36 % für das Volumen und 32 % für Na. Im zweiten Teil (Zyklus 17 - 29) ergeben sich anders als für die Variable Rektaltemperatur keine freilaufenden Rhythmen in den Urinvariablen. Die Variablen Na und Volumen sind völlig arrhythmisch, K und Ca zeigen eine in der Reliabilität grenzwertige Rhythmik, aber eben nicht freilaufend wie die Rektaltemperatur, sondern im Sinne einer Synchronisation durch den Zeitgeber.

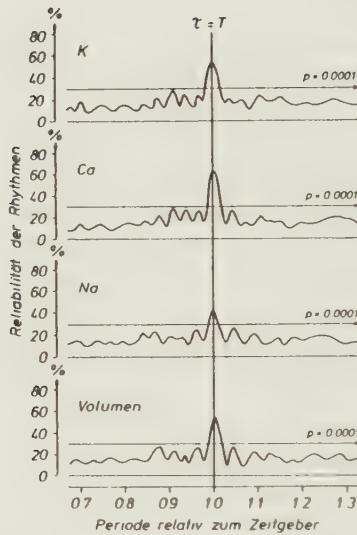


Abb. 20: Periodogramme von vier Urinvariablen des Versuches 289 (siehe auch Legende zu Abb. 18)

Abschließend soll noch über die Ergebnisse der Versuche mit Veränderung der Beleuchtungsstärke berichtet werden.

Im Versuch 285 (vgl. Abb. 2 g und Abb. 14) wurde die Analyse getrennt für die beiden Abschnitte mit verschiedener Beleuchtung durchgeführt. Im ersten Versuchsteil mit normalem Licht als Zeitgeber zeigen die Urinvariablen Ca, K und Volumen wie die Rektaltemperatur eine freilaufende Rhythmik. Die Prozentwerte der Reliabilität bewegen sich zwischen 32 % für das Volumen und 37 % für Ca (34 % für K). Für die Variable Na ergibt sich in der Periodenanalyse kein reliabler Rhythmus. In der zweiten Versuchshälfte mit hellem Licht als Zeitgeber gilt letzteres für alle Urinvariablen: Für keine ist im Periodogramm ein abgrenzbarer Peak zu erkennen, auch nicht unterhalb der Signifikanzschwelle von 30 %.

Auch für die Analyse von Versuch 288 und 294 wurden die Datenreihen entsprechend der Änderung der Beleuchtung geteilt. Im ersten Teil mit hellem Licht zeigen die Urinvariablen im Versuch 288 (vgl. Abb. 2 h und Abb. 16) zum Zeitgeber synchrone Rhythmen. Lediglich in der Variablen K zeigt sich im letzten Drittel des ersten Versuchsteils ein angedeuteter Freilaufrythmus neben der synchronisierten Komponente. Im zweiten Versuchsteil mit normalem Licht als Zeitgeber eines 28 h-Tages verschwindet die Rhythmik der Variablen Na, während K und Ca eine freilaufende Rhythmik von 24,5 h Periodenlänge mit Reliabilitäten von 44 % bzw. 42 % aufweisen. Die Variable Ca hat daneben auch eine zum Zeitgeber synchrone Rhythmuskomponente (Reliabilität 35 %). Im Periodogramm für das Volumen zeigt sich ein allerdings sehr breiter Peak mit einer Reliabilität

von 37 % im Bereich von 26 h bis 28 h, aber kein Freilaufpeak.

Die Ergebnisse des Versuches 294 (vgl. Abb. 2 i und Abb. 17) sind ähnlich. Im Versuchsteil mit hellem Licht zeigen außer der Variablen Volumen, die arhythmisch ist, alle Urinvariablen reliable Rhythmen. Die Periodenlänge entspricht der des Zeitgebers, es liegt Synchronisation vor. Die Reliabilitäten reichen von 35 % für Na bis 45 % für K (Ca: 41 %). Gegen Ende des ersten Teils zeigen sich ähnlich wie für die Variable K im Versuch 288 Freilaufkomponenten in den Rhythmen von Ca und K, in der Reliabilität allerdings deutlich unterschwellig. Wegen der Kürze der Datenreihe läßt sich keine genaue Periodenlänge angeben. Im zweiten Teil mit Normallicht bleibt die Variable Volumen arhythmisch. Die anderen Variablen zeigen zwei Rhythmikkomponenten bei 24,4 h und bei 28,0 h Periodenlänge. Für beide liegen die Prozentwerte der Reliabilität allerdings um den Schwellenwert von 30 %. Qualitativ ist das Ergebnis mit dem der Variablen Rektaltemperatur vergleichbar. Es muß nicht nur in diesem Versuch auch an die Möglichkeit einer Maskierung der Urinvariablen durch den Wechsel von Schlafen und Wachen gedacht werden.

VI. DISKUSSION =====

1. Persönlichkeitsdaten

Es stellt sich immer wieder die Frage, inwieweit die Ergebnisse von Experimenten mit freiwilligen Versuchspersonen verallgemeinert werden können, und inwieweit die Versuchsbedingungen an sich die Meßergebnisse verändert haben könnten. In Hinblick darauf sind die Ergebnisse der psychologischen Tests, wie sie bei den in dieser Arbeit beschriebenen Versuchen durchgeführt wurden, sicherlich sehr interessant.

Bei der Auswertung wurden drei Punkte besonders beachtet. Wie sind die Ergebnisse im Vergleich zu bekannten (Eich-) Stichproben, und wie verhalten sich die Ergebnisse der Tests nach dem Versuch im Vergleich zu denen vor dem Versuch. Außerdem wurden die Probanden vor allem nach dem Versuch auch eingehend nach ihrer subjektiven Einschätzung befragt.

Die Ergebnisse des Fragebogens VELA (vegitative Labilität) und des Fragebogens E.N.NR. (Extraversion, Neurotische Tendenz und Rigidität) decken sich annähernd mit den Ergebnissen der Eichstichproben ihrer Autoren.

Auch bei der Auswertung des Östberg-Fragebogens ergab sich bei einem vergleichsweise kleinen $n=9$ eine Verteilung, die der von Östberg angegebenen entspricht. Somit unterscheiden sich die freiwilligen Testpersonen, die an den hier beschriebenen Versuchen teilgenommen hatten, in diesen Punkten nicht vom Durchschnitt der Bevölkerung.

Für alle Tests, die vor und nach dem Versuch gegeben wurden, war kein statistisch signifikanter Unterschied vorher - nachher nachweisbar (siehe Tab. 2). Diese Aus-

sage gilt auch für das Körpergewicht der Versuchspersonen, wobei die geringe Gewichtsabnahme in den Versuchen 283, 288 und 294 von den Versuchspersonen beabsichtigt war.

Es wurde weiter oben auch von Korrelationen zwischen den verschiedenen Testverfahren berichtet. Wie erwähnt, entsprechen auch diese den in der Literatur beschriebenen Korrelationen. Zusammenfassend läßt sich folglich sagen, daß sich in allen psychologischen Tests keine auffälligen Abweichungen vom "Normalen" ergaben, und daß durch den Versuch die Ergebnisse für die Persönlichkeitsmerkmale nicht verändert wurden, sondern bei Versuchsende reproduzierbar waren. Die Befragung der Probanden am Ende erbrachte, daß Versuch und Versuchsbedingungen als positiv empfunden wurden: Der Versuch an sich sei zwar etwas Ungewöhnliches, aber dennoch angenehm und bedeute auf keinen Fall eine Streßsituation. Dies scheint besonders wichtig, denn Streß kommt sicherlich als ein die Versuchsergebnisse einseitig beeinflussender Faktor in Betracht [36].

Noch ein Ergebnis ist über die spezielle Fragestellung dieser Arbeit hinaus von Interesse: Es war den Probanden nicht möglich, die Zeitgebermodalitäten exakt zu beurteilen. Die stetige Veränderung der Zeitgeberperiode wurde nicht bemerkt und auch die Richtung der Abweichung vom 24 h-Tag konnte nicht in jedem Fall richtig eingeschätzt werden.

2. Synchronisierbarkeit der endogenen Rhythmik durch einen Zeitgeber mit hellem Licht

In der Einleitung wurde von Wevers Experimenten zur fraktionierten Desynchronisation berichtet, die dieser Arbeit als Vergleichsversuche dienen.

Für den dort verwendeten kombinierten Zeitgeber aus Gongsignalen und normalem Licht wurde eine Mitnahmebereich für die Rhythmik der physiologischen Variablen von $26,91 \pm 0,24$ h als obere Grenze bzw. von $22,34 \pm 0,17$ h als untere Grenze ermittelt. Es soll hier noch einmal erwähnt werden, daß die Gongsignale einen wesentlichen Anteil an der Wirksamkeit dieses Zeitgebers hatten (sozialer Kontakt, evtl. Tagesstrukturierung). In den Versuchen, über die hier berichtet wird, wurden meist die gleichen Versuchsbedingungen gewählt, der einzige Unterschied war die Verwendung von hellem Licht (> 3000 lx) als Zeitgeber.

Die Aktivitätsrhythmik folgte - wie auch in den Versuchen mit normalem Licht - dem Zeitgeber in allen Versuchen. Es wurde schon früher gezeigt, daß der Mitnahmebereich für die Aktivitätsrhythmik auch mit normalem Licht als Zeitgeber weit größer ist als für die physiologischen Variablen [36]. Einzig im Versuch 283 (Abb. 2 e) folgt die Aktivitätsrhythmik dem Zeitgeber nicht so streng wie in den anderen Experimenten. Es ergibt sich ein Bild im Sinn der relativen Synchronisation [36].

Für die physiologischen Rhythmen, vor allem vertreten durch die Rektaltemperatur, ergibt sich bei den Versuchen mit hellem Licht ein weit größerer Mitnahmebereich als mit normalem Licht. Dies läßt auf eine vergleichsweise viel stärkere Zeitgeber-Wirkung des hellen Lichts schließen.

In den Versuchen 270, 272 ($T_{\max} \sim 29.00$ h) und 289 ($T_{\min} \sim 19.00$ h) war die Versuchszeit nicht ausreichend, um eine Grenze des Mitnahmebereiches zu erreichen (Abb. 2 b, 2 c und 2 f), und auch im Versuch 298 (Abb. 2 d) mit vergrößerter Verlängerungsrate ($T_{\max} \sim 31.00$ h) war die Rektaltemperaturrhythmik bis zum Ende des Versuches synchronisiert.

In den Versuchen 288 und 294 (Abb. 2 h und 2 i) war die maximale Zeitgeberperiode $T = 28.00$ h. Im Versuchsteil mit hellem Licht lag bei dieser Zeitgeberperiodenlänge ebenfalls Synchronisation der Rektaltemperatur außerhalb des bisher gefundenen Mitnahmebereichs vor. Erst nach der Umstellung auf Normallicht - bei unveränderter Zeitgeberperiode - zeigte der Temperaturrhythmus einen Freilauf.

Auch der vergleichsweise frühe Abriß des Rhythmus der Rektaltemperatur im Versuch 269 (Abb. 2 a und Abb. 7) und 283 (Abb. 2 e und Abb. 11) liegt jeweils außerhalb dieses Mitnahmebereiches für normales Licht ($T = 27,33$ h für den Versuch 269 und $T = 21,33$ h für Versuch 283). Den Unterschied zwischen Synchronisation über den ganzen Versuch einerseits und während des Versuches auftretendem Freilauf andererseits bei Verwendung von hellem Licht sollen die Abbildungen 21 a und 21 b verdeutlichen. Davon abgesehen, daß der Abriß im Versuch 269 (Abb. 21 b) über dem Wert von $26,91 \pm 0,24$ h für die obere Grenze des Mitnahmebereiches für normales Licht liegt, ergibt sich qualitativ ein den Versuchen mit normalem Licht vergleichbares Bild.

Eine Erklärung für diesen frühen Abriß lieferte die Befragung des Probanden nach Ende des Versuches. Er gab an, daß ihm das helle Licht (in diesem Versuch wurden noch Quecksilberdampflampen verwendet) unangenehm gewesen sei, und daß er ihm so weit wie möglich ausgewichen sei. Tatsächlich ergab die Auswertung der

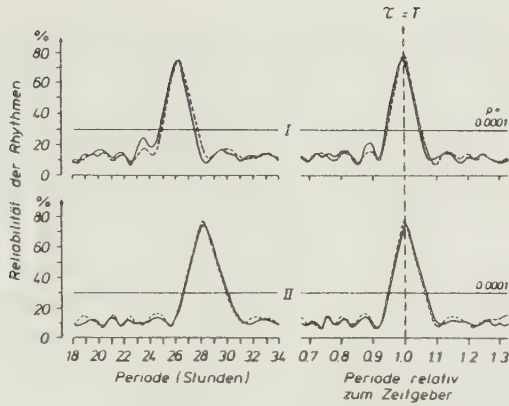


Abb. 21 a: Siehe Abb. 21 b

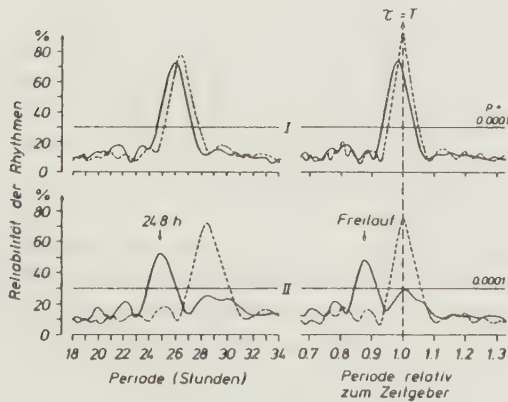


Abb. 21 b: Periodogramme der Variablen Rektaltemperatur (—) und Aktivität (-----) des Versuches 272 (Abb. 21 a) und des Versuches 269 (Abb. 21 b). Die Einteilung in Abb. 21 b entspricht der in Abb. 19. Die Zeitreihen von Versuch 272 (Abb. 21 a) wurden zum Vergleich mit Versuch 269 entsprechend unterteilt.

Aktivitätsregistrierung, daß sich diese Versuchsperson weit weniger (unter 3 h) im Bereich des sehr hellen Lichtes ($> 3000 \text{ lx}$) aufgehalten hatte als die anderen Versuchspersonen. Der Schluß liegt nahe, daß eine bestimmte Mindestaufenthaltsdauer im hellen Licht für eine vollständige, synchronisierende Zeitgeberwirkung notwendig ist.

Der Abriß des Rhythmus der Rektaltemperatur im Versuch 283 (Abb. 2 e und Abb. 11) ist unter einem anderen Gesichtspunkt zu sehen, da sich kein Hinweis auf ein das helle Licht vermeidendes Verhalten des Probanden fand. Wie oben erwähnt, ist jedoch auch die Schlaf-Wach-Periodik nicht voll synchronisiert, sondern zeigt relative Synchronisation. Im Hinblick darauf ist der vergleichsweise frühe Abriß des Rektaltemperaturrhythmus nicht überraschend.

Die Phasenbeziehungen der Variablen Aktivität und Rektaltemperatur (siehe Tab. 6) entsprechen den bisher beschriebenen Regeln für das Phasenverhalten von Rhythmen in der circadianen Periodik [32]. Diese Regeln, die für Zeitgeberperiodenlängen zwischen 23 h und 27 h aufgestellt wurden, haben auch für den erweiterten Mitnahmebereich in den hier beschriebenen Versuchen Gültigkeit. Bei Synchronisation durch den Zeitgeber auf Perioden, die länger sind als die Freilaufperiode, lag die Acrophase des Rektaltemperaturrhythmus früh, bei Perioden, die kürzer sind, spät. Ähnliches ergibt sich für die Aktivitätsperiodik: frühe Acrophase bei langer Zeitgeberperiode (aber später als die Acrophase der Rektaltemperatur) und späte Acrophase bei kurzer Zeitgeberperiode (aber früher als die Acrophase der Rektaltemperatur).

Die Acrophase des Aktivitätsrhythmus verschiebt sich also auch in diesen Versuchen mit sich ändernder Zeit-

geberperiodenlänge weniger als die des Rektaltemperaturrhythmus, aber jeweils in gleicher Richtung.

Auch die Größe der Amplituden und vor allem der Reliabilitäten der Rhythmen von Aktivität und Rektaltemperatur jeweils für die Abschnitte mit Synchronisation und mit Desynchronisation entsprechen dem, was nach Modellüberlegungen zur circadianen Periodik [36] zu erwarten ist: hohe Reliabilitäten und größere Amplituden bei Synchronisation, Abnahme der Größe beider Parameter bei Desynchronisation (siehe Tab. 4 und 5, der Versuch 285 ist gesondert zu sehen, da über die gesamte Versuchsdauer Desynchronisation vorlag).

Die Rhythmik der Urinvariablen entsprach in den meisten Versuchen der der Rektaltemperatur. In einigen Versuchen (z.B. V 269 oder V 270) zeigen die Variablen Natrium und Volumen keine reliablen Rhythmen im Gegensatz zu Calcium und Kalium. Dies kann jedoch für diese beiden Variablen öfters beobachtet werden.

In zwei Versuchen (V 272 und V 289) waren die Rhythmen der Urinvariablen wie die Rektaltemperatur bis zum Ende des Versuches synchronisiert. Eine Grenze des Mitnahmebereiches war hier nicht nachzuweisen. Das ist im Versuch 269 anders: Dort ergab sich für die Urinvariablen der gleiche Abrißzeitpunkt wie für die Rektaltemperatur ($T = 27,33$ h).

In den Versuchen 288 und 294 (Versuchsteil mit hellem Licht) sowie im Versuch 298 lag für die Rektaltemperatur Synchronisation bis zur maximalen Zeitgeberperiode vor, während in der Rhythmik der Urinvariablen schon vorher auch eine Freilaufkomponente nachzuweisen war. Die Grenze des Mitnahmebereiches war hier also für die Urinvariablen schon überschritten, nicht

jedoch für die Rektaltemperatur. Auch in den Experimenten zur fraktionierten Desynchronisation mit normalem Licht sind solche Unterschiede im Mitnahmebereich für verschiedene Variablen aufgetreten [39]. Dies impliziert jedoch nicht zwangsläufig das Vorhandensein von mehr als zwei verschiedenen Oszillatoren, die für die unterschiedlichen Mitnahmebereiche verantwortlich sind [35, 39].

Im Versuch 283 (Vekürzung des Zeitgebers) war im zweiten Versuchsteil im Rektaltemperaturrhythmus nach vorheriger Synchronisation ein Freilauf aufgetreten. Bei gleicher Unterteilung war für die Rhythmik aller Urinvariablen im Teil 1 ebenfalls Synchronisation nachzuweisen, im Teil 2 jedoch nicht wie für die Rektaltemperatur eine freilaufende Rhythmik: Na und Volumen waren hier arrhythmisch und Ca und K zeigten (allerdings nur schwach ausgeprägt) Synchronisation zum Zeitgeber. Auch im Versuch 270 (Verlängerung des Zeitgebers) war im zweiten Teil des Versuches in den Urinvariablen Arrhythmie aufgetreten, obwohl hier ein bis zum Ende synchronisierter Rhythmus der Rektaltemperatur nachzuweisen war. Im Versuch 285 (Wechsel der Beleuchtungsbedingungen) zeigte die Rektaltemperatur in beiden Versuchsabschnitten einen freilaufenden Rhythmus. Für die Urinvariablen fand sich ein Freilauf nur im Versuchsteil mit normalem Licht. Nach Umstellung auf helles Licht war keine Rhythmik mehr nachweisbar.

Während in den zuerst genannten Versuchen das helle Licht als Zeitgeber auch für die Urinvariablen einen erweiterten Mitnahmebereich bzw. der Rektaltemperatur vergleichbare Ergebnisse bewirkt hatte, so lassen doch gerade die drei zuletzt genannten Versuche (283, 270 und 285) auch noch andere Effekte des hellen Lichtes möglich erscheinen. Bei Auftreten von Desynchronisation

zwischen Rektaltemperatur- und Schlaf-Wach-Rhythmus (V 283 und V 285) zeigt sich eine Tendenz zur Arrhythmie in den Urinvariablen (im Versuch 285 ist auch die Amplitude und die Reliabilität des freilaufenden Rhythmus der Rektaltemperatur unter hellem Licht kleiner als unter normalem Licht, siehe Tab. 5). Wie könnten diese Effekte vermittelt werden?

Licht normaler Intensität gilt beim Menschen als sehr schwacher Zeitgeber. Wever fand für einen Hell-Dunkel-Zeitgeber einen Mitnahmebereich von kleiner als $\pm 1,0$ h [36], der nur in Kombination mit Gongsignalen den oben erwähnten erweiterten Mitnahmebereich von $22,34 \pm 0,17$ h bis $26,91 \pm 0,24$ h bewirkt, wobei dem Verhaltensaspekt eine große Rolle zukommt. In den hier beschriebenen Versuchen ist eine wesentliche Steigerung dieser Komponente äußerst unwahrscheinlich. Somit muß die verstärkte Zeitgeberwirkung des hellen Lichtes eine direkt physiologische - wohl über den Retinohypothalamischen Trakt vermittelte - sein. Dies ist in Anbetracht der in der Einleitung erwähnten Untersuchungen von Lewy et al. zur Wirkung von Licht auf die Melatoninsekretion [22] plausibel. Beim Menschen wirkt Licht erst ab Intensitäten, die für Kunstlicht sehr hoch sind, in physiologisch meßbarer Weise, bei Tieren genügen weit geringere Beleuchtungsstärken, um meßbare Veränderungen zu erreichen [16, 18, 26, 28].

Untersuchungen über den Einfluß der Beleuchtungsstärke auf die Freilaufperiode unter Dauerbedingungen haben für alle nachtaktiven Vögel und Säugetiere und für fast alle tagaktiven Säugetiere folgende Regel erbracht: je größer die Beleuchtungsstärke (untersucht wurde je nach Art der Bereich von 0 bis zu einigen Hundert Lux), desto länger die Freilaufperiode [7, 8]. In der Einleitung wurde erwähnt, daß sich beim Menschen

anders als beim Tier die Freilaufperiode bei Variierung der Beleuchtungsstärke (von 0 bis 1500 lx) nicht regelhaft ändert [33]. In den Versuchen dieser Arbeit war Licht zwar keine Dauerbedingung, sondern wurde als Zeitgeber zur Erzeugung eines Hell-Dunkel-Wechsels verwendet, doch seien im folgenden die Freilaufperiodenlängen der Rektaltemperatur, wie sie unter hellem und unter normalem Licht auftraten, gegenübergestellt:

Freilauf unter hellem Licht als Zeitgeber

V 269	24,8 h	
V 283	24,6 h	Mittelwert: $24,63 \pm 0,153$ h
V 285	24,5	

Freilauf unter normalem Licht als Zeitgeber

V 285	24,5 h	
V 288	24,6 h	Mittelwert: $24,5 \pm 0,1$ h
V 295	24,4 h	

(jeweils im Versuchsabschnitt mit interner Desynchronisation ermittelt).

Natürlich ist der minimale Unterschied im Mittelwert weit entfernt von statistischer Signifikanz und kann z.B. auch durch individuelle Merkmale der Versuchspersonen bedingt sein.

Die Tendenz des Unterschiedes (höhere Lichtintensität - längere Freilaufperiode) wird jedoch in ersten Versuchen unter hellem Dauerlicht bestätigt.

Für Vögel ist es bekannt, daß bei Dauerlicht ab einer bestimmten Intensität die circadiane Rhythmik erlischt. Die Tiere werden arhythmisch. Es handelt sich dabei um Intensitäten weit unterhalb der für die Unterdrückung der Melatoninsekretion beim Menschen nötigen Schwelle

[37, 38]. Aufgrund der oben angeführten Parallelen zwischen dem Einfluß von (normalem) Licht auf Tiere und von hellem Licht auf den Menschen ist eine solche arhythmisierende Wirkung von hellem Licht beim Menschen in Betracht zu ziehen. Die Möglichkeit der Unterdrückung der Selbsterregung des circadianen Systems kann sicher nicht für alle Variablen angenommen werden, zeigt doch z.B. die Rektaltemperatur in den Versuchen 269 und 283 reliable von der Zeitgeberperiode verschiedene Freilaufrrhythmen. Aber vielleicht trifft diese Möglichkeit im Grenzfall für die Arrhythmie der Urinvariablen in den Versuchen 270, 283 und 285 zu.

Wenn man eine Abschwächung (oder gar Unterdrückung) der Selbsterregung durch helles Licht annimmt, so muß man auch daran denken, daß sich der Anteil des Maskierungseffektes an der Gesamtrhythmik der physiologischen Variablen unter diesen Bedingungen erhöhen könnte. Im zweiten Teil des Versuches 283 war im Rhythmus der Rektaltemperatur neben einem Freilauf auch eine vom Zeitgeber synchronisierte Komponente nachweisbar. Durch die "Demaskierung" konnte diese Komponente praktisch eliminiert werden (Abb. 12 und Abb. 13). Die in den Urinvariablen nachweisbare grenzwertige, synchronisierte Rhythmik in diesem Versuchsteil könnte - bei Fehlen eines Freilaufes in den Urinvariablen - durch reines Masking bedingt sein.

In den Versuchen 288 und 294 hatte nach dem Wechsel zu normalem Licht die synchronisierte Komponente der Rektaltemperaturrhythmik - nur diese war im ersten Versuchsteil nachweisbar - eine größere Reliabilität als die Freilaufkomponente. Dies wird auch in den Balkendarstellungen (Abb. 2 h und Abb. 2 i) deutlich: Die Lage der Maxima und Minima lassen an Synchronisation durch den Zeitgeber auch in diesem Abschnitt denken.

Erst in den letzten Zyklen wird auch hier die freilaufende Rhythmik erkennbar, die, wie die "Demaskierung" zeigt, schon vom Zeitpunkt des Wechsels auf normales Licht vorhanden war (Abb. 16 und Abb. 17 unten). Es ist denkbar, daß die Wirkung des hellen Lichts aus dem ersten Versuchsteil auf die Rhythmik nach dem Wechsel auf Normallicht erst im Verlauf einiger Zyklen abklingt.

Wenn es einen - durch helles Licht bedingten - vergrößerten Anteil des Maskiereffektes an der Gesamtrhythmik gibt, so ist er aber individuell unterschiedlich stark ausgeprägt. Das zeigt der Vergleich zwischen Versuch 288 und 294. Der im jeweils zweiten Teil ermittelte Betrag des Maskiereffektes wurde auch im ersten Teil von den Wachwerten der Rektaltemperatur abgezogen. Danach wurde die Periodenanalyse und die Berechnung des mittleren Verlaufes wiederholt. Während diese Maßnahme im Versuch 294 zu einer sehr deutlichen Reduzierung von Reliabilität und Amplitude des Rektaltemperaturrhythmus führte, bleibt im Versuch 288 der größte Teil der Rhythmik bestehen (Abb. 16 und 17 oben). Das Auftreten einer Freilauferrhythmik unter hellem Licht (V 269 und V 283) zeigt ebenfalls, daß helles Licht nicht in jedem Fall die Selbsterregung der circadianen Rhythmik unterdrückt, doch ist für die starke Erweiterung des Mitnahmebereiches durch helles Licht als Zeitgeber in den anderen Versuchen an diese Wirkmöglichkeit zu denken.

Der Einfangbereich wird durch helles Licht nicht in gleichem Maße wie der Haltebereich erweitert: Die Zeitgeberperiode von 28:00 h (mit hellem Licht) hat in jedem Falle innerhalb des Haltebereiches gelegen; wie der Versuch 285 zeigt, liegt sie aber außerhalb des Fangbereiches. Es war im zweiten Teil mit hellem Licht

nicht möglich, den freilaufenden Rhythmus der Körpertemperatur voll auf die Zeitgeberperiode zu synchronisieren bzw. die Reliabilität der synchronisierten Komponente zu erhöhen.

Mit Sicherheit ist helles Licht jedoch ein weitaus stärkerer Zeitgeber als normales Licht, was durch seine physiologische Wirkung bedingt sein dürfte (ein verstärkter Verhaltenseffekt kommt dafür, wie oben erwähnt, nicht in Frage): Erst helles Licht wirkt auf den Menschen so wie normales Licht auf Tiere.

Weitere Versuche mit hellem Licht sollten durchgeführt werden, um noch mehr Einsicht in die Physiologie der circadianen Rhythmik zu gewinnen. Schon jetzt ergeben sich auch praktische Anwendungen dieses effektiven Zeitgebers. Z.B. könnten die Beschwerden nach Transmeridianflügen durch Ausnützung der Effekte von hellem Licht gemindert werden: Setzen sich die betroffenen Personen einen ausreichend langen Teil (> 3 Stunden, s.o.) des zeitlich verschobenen Tages hellem Licht (> 3000 lx) aus, so ist eine schnellere Wiederanpassung der circadianen Rhythmen an die neue Ortszeit zu erwarten.

Auch die Anpassung von Schichtarbeitern an ihre wechselnden Arbeitszeiten könnte vielleicht verbessert werden, wenn helles Licht während der Arbeitszeit verwendet wird. Im Bereich der Psychiatrie sind Anwendungen von hellem Licht zur Stabilisierung bei Rhythmusstörungen wie z.B. dem Phase-Delay-Syndrom denkbar.

VII. ZUSAMMENFASSUNG

=====

Bisher wurde in Untersuchungen über den Einfluß von Licht auf die circadiane Periodik des Menschen nur Raumlicht herkömmlicher Intensitäten ($< 1000 \text{ lx}$) verwendet. Seit 1980 ist es bekannt, daß die nächtliche Melatoninsekretion des Menschen erst mit sehr hellem Raumlicht ($> 2500 \text{ lx}$) zu unterdrücken ist.

In dieser Arbeit wird über 9 Versuche zur circadianen Rhythmik des Menschen berichtet, in denen erstmals sehr helles Licht ($> 3000 \text{ lx}$) verwendet wurde. Die Versuche wurden unter vorübergehender Isolation, d.h. unter Ausschluß aller natürlichen Zeitsignale durchgeführt und dauerten jeweils etwa 4 Wochen. Die Versuchspersonen waren dem hellen Licht im Rahmen eines künstlichen Hell-Dunkel-Wechsels in Verbindung mit regelmäßig ertönenden Gongsignalen ausgesetzt.

Für einen solchen kombinierten Zeitgeber ist aus früheren Versuchen mit normalem Licht der Mitnahmebereich der Rhythmen der physiologischen Variablen bekannt: Bei stetiger Verlängerung des Zeitgebers ergibt sich für die obere Grenze des Mitnahmebereiches ein Wert von $26,91 \pm 0,24 \text{ h}$, bei Verkürzung für die untere Grenze ein Wert von $22,41 \pm 0,17 \text{ h}$. Die Zeitgeberwirkung wird dabei überwiegend über einen indirekten Einfluß des Lichtes auf das Verhalten vermittelt.

In den hier beschriebenen Versuchen mit sehr hellem Licht dagegen lassen sich die Rhythmen von Rektaltemperatur, Aktivität und anderen Variablen bis zu Periodenlängen des Zeitgebers von über 30 h (Verlängerung) bzw. von unter 19 h (Verkürzung) synchronisieren. Dazu ist es - wie ein Versuch mit stetiger Verlängerung des Zeit-

gebers zeigte - notwendig, daß sich die Versuchsperson mehr als drei Stunden im Bereich des hellen Lichts aufhält.

Wie die Ergebnisse zeigen, ist der Zeitgeber mit hellem Licht vielfach stärker als der mit normalem Licht. Im Gegensatz zu dem vor allem über das Verhalten wirkenden Einfluß eines Hell-Dunkel-Zeitgebers mit normalem Licht übt helles Licht einen direkten, physiologischen Einfluß aus, der dem aus Tierversuchen bekannten entspricht. Dies wird besonders anhand der Ergebnisse der Rhythmen der Urinvariablen diskutiert. Mögliche praktische Anwendungen von sehr hellem Licht werden abschließend erwähnt (Transmeridianflüge, Schichtarbeit und Rhythmusstörungen im Bereich der Psychiatrie).

VIII. LITERATURVERZEICHNIS
=====

- [1] Aschoff, J.: Zeitgeber der tierischen Tagesperiodik. *Naturwissenschaften* 41, 49-56 (1954)
- [2] Aschoff, J.: Exogenous and endogenous components in circadian rhythms. *Cold Spring Harb. Symp. Quant. Biol.* 25, 11-28 (1960)
- [3] Aschoff, J., Wever, R.: Spontanperiodik des Menschen bei Ausschluß aller Zeitgeber. *Naturwissenschaften* 49, 337-342 (1962)
- [4] Aschoff, J.: Tagesperiodik licht- und dunkelaktiver Tiere. *Rev. Suisse Zool.* 71, 528-558 (1964)
- [5] Aschoff, J., Klotter, K., Wever, R.: Circadian vocabulary. In: *Circadian Clocks*. Aschoff, J. (Ed.), North-Holland Publ. Comp. Amsterdam (1965)
- [6] Aschoff, J., Pöppel, E., Wever, R.: Circadiane Periodik des Menschen unter dem Einfluß von Licht-Dunkel-Wechseln unterschiedlicher Periode. *Pflügers Arch.* 306, 58-70 (1969)
- [7] Aschoff, J.: Circadian rhythms: influences of internal and external factors on the period measured in constant conditions. *Z. Tierpsychol.* 49, 225-249 (1979)

- [8] Aschoff, J.: Freerunning and entrained circadian rhythms. In: Handbook of Behavioral Neurobiology, Vol. 4, Aschoff, J. (Ed.), Plenum Publishing Corporation (1981)
- [9] Brengelmann, J.C., Brengelmann, L.: Deutsche Validierung von Fragebogen der Extraversion, neurotischen Tendenz und Rigidität. Z. exp. angew. Psychol. 7, 291-331 (1960)
- [10] Fahrenberg, J.: Ein itemanalysierter Fragebogen funktionell-körperlicher Beschwerden (VELA). Diagnostica 11, 141-153 (1965)
- [11] Fahrenberg, J., Selg, H.: Das Freiburger Persönlichkeitsinventar FPI, Verlag Psychologie, Göttingen (1970)
- [12] Folkard, S., Knauth, P., Monk, T.H., Rutenfranz, J.: The effect of memory load on the circadian variation in performance efficiency under a rapidly rotating shift system. Ergonomics 19, 479-488 (1976)
- [13] Gierse, A.: Quaemiam sit ratio caloris organici. Dissertation, Halle (1842)
- [14] Gwinner, E.: A comparative study of circannual rhythms in warblers. Biochronometry. Nat. Acad. Sciences, Washington D.C. (1971)
- [15] Halberg, F.: Temporal coordination of physiology functions. Cold Spring Harbor Symp. Quant. Biol. 25, 289 (1960)

- [16] Hoffmann, K., Illnerova, H., Vanecek, J.: Effect of photoperiod and of one minute light at night-time on the pineal rhythm of N-acetyltransferase activity in the Djungarian hamster *phodopus syngorus*. Biol. Reprod. 24, 551-556 (1981)
- [17] Holst, E.v.: Die relative Koordination als Phänomen und als Methode zentralnervöser Funktionsanalyse. Ergeb. Physiol. 42, 228-306 (1939)
- [18] Illnerova, H., Vanecek, J.: Response of rat pineal serotonin N-acetyltransferase to one min light pulse at different night times. Brain Res. 167, 431-434 (1979)
- [19] Jimerson, D.C., Lynch, H.J., Post, R.M., Wurtman, R.J., Bunney, W.E.: Urinary melatonin rhythms during sleep deprivation in depressed patients and normals. Life Sci. 20, 1501-1508 (1977)
- [20] Jürgensen, T.: Die Körperwärme des gesunden Menschen. Leipzig (1873)
- [21] Lewy, A.J., Markey, S.P.: Analysis of melatonin in human plasma by gas chromatography negative chemical ionization mass spectrometry. Science 201, 741-743 (1978)
- [22] Lewy, A.J., Wehr, T.A., Goodwin, F.K., Newsome, D.A., Markey, S.P.: Light suppresses melatonin secretion in humans. Science 210, 1267-1269 (1980)

- [23] Lund, R.: Circadiane Periodik physiologischer und psychologischer Variablen bei 7 blinden Vpn mit und ohne Zeitgeber. Dissertation, München (1974)

- [24] Menaker, M., Takahashi, J.S., Eskin, A.: The physiology of circadian pacemakers. *Ann. Rev. Physiol.* 40, 501-526 (1978)

- [25] Östberg, O.: Zur Typologie der circadianen Phasenlage. Ansätze zu einer praktischen Chronohygiene. *Biologische Rhythmen und Arbeit.* Springer Verlag (1976)

- [26] Perlow, M.J., Reppert, S.M., Boyar, R.M., Klein, D.C.: Daily rhythms in cortisol and melatonin in primate cerebrospinal fluid. Effects of constant light and dark. *Neuroendocrinology* 32, 193-196 (1981)

- [27] Ralph, C.L., Hull, D., Lynch, H.J., Hedlund, L.A.: A melatonin rhythm persists in rat pineals in darkness. *Endocrinology* 89, 1361-1366 (1971)

- [28] Rollag, M.D., Niswender, G.D.: Radioimmunoassay of serum concentrations of melatonin in sheep exposed to different light regimes. *Endocrinology* 98, 482-489 (1976)

- [29] Wever, R.: Ein mathematisches Modell für die circadiane Periodik. *Z. angew. Math. Mech.* 46, T 148-157 (1966)

- [30] Wever, R.: Autonome circadiane Periodik des Menschen unter dem Einfluß verschiedener Beleuchtungs-Bedingungen. *Pflügers Arch.* 306, 71-91 (1969)
- [31] Wever, R.: Zur Zeitgeber-Stärke eines Licht-Dunkel-Wechsels für die circadiane Periodik des Menschen. *Pflügers Arch.* 321, 133-142 (1970)
- [32] Wever, R.: Mutual relations between different physiological functions in circadian rhythms in man. *J. Interdiscipl. Cycle Res.*, vol. 3, number 2, 253-265 (1972)
- [33] Wever, R.: Der Einfluß des Lichtes auf die circadiane Periodik des Menschen (I. Teil). *Z. Physik. Med.* 3, 121-134 (1973)
- [34] Wever, R.: Der Einfluß des Lichts auf die circadiane Periodik des Menschen (II. Teil). *Z. Physik. Med.* 3, 137-150 (1974)
- [35] Wever, R.: The circadian multi-oscillator system of man. *Int. J. Chronobiol.* 3, 19-55 (1975)
- [36] Wever, R.A.: *The Circadian System of Man.* Springer Verlag. New York, Heidelberg, Berlin (1979)
- [37] Wever, R.: Circadian rhythms of finches under bright light: is self-sustainment a pre-condition for circadian rhythmicity? *J. Comp. Physiol.* 139, 49-58 (1980)

- [38] Wever, R.: Circadian rhythms of finches under steadily changing light intensity: are self-sustaining circadian rhythms self-excitatory? J. Comp. Physiol. 140, 113-119 (1980)
- [39] Wever, R.A.: Fractional desynchronization of human circadian rhythms. Pflügers Archiv 396, 128-137 (1983)
- [40] Wever, R.A.: Internal interactions within the human circadian system: the masking effect. Experientia 41, 332-342 (1985)

LEBENS LAUF

Am 04.08.58 wurde ich als Sohn von Barbara Polasek, geb. Effenberger, und von Jan Polasek in Prag geboren. Seit 1960 lebe ich in der Bundesrepublik Deutschland.

Von 1964 bis 1968 besuchte ich die Volksschule in Gauting und anschließend das Gymnasium in Germering. Nach dem Abitur 1977 arbeitete ich ein knappes Jahr in der Privatklinik Dr. Schindlbeck in Herrsching als Hilfskrankenpfleger, bevor ich mein Medizinstudium an der Universität Mainz und dann an der LMU München aufnahm. Dieses Studium habe ich im Herbst 1984 mit dem III. Staatsexamen abgeschlossen. Von Januar bis März 1985 war ich als Assistenzarzt an der Privatklinik Dr. Schindlbeck beschäftigt.

Im Jahr 1982 begann ich am Max-Planck-Institut für Psychiatrie, Außenstelle Andechs, mit meiner Doktorarbeit. Seit April 1985 arbeite ich dort als wissenschaftlicher Mitarbeiter im Rahmen eines Stipendiats der Max-Planck-Gesellschaft.

Mit meiner Frau Christiane Polasek, geb. Schnell, bin ich seit 1979 verheiratet. Wir haben zusammen zwei Kinder im Alter von drei und sechs Jahren.

